الفصل الرابع

كواشف الإشعاعات النووية
Nuclear radiation detectors

– مقدمة – حركة الإلكترونات والأيونات في الغازات – التيار الإلكتروني والأيوني في الغازات – الكواشف الغازية – غرفة الانتشار التناسبية – عدادات غايغر ميولر – الغرفة السحابية – غرفة الانتشار – الغرفة الفقاعية – الكواشف الوميضية – الكواشف شبه الموصلة – العداد الشراري – كواشف نشيرنكوف – ألواح وأفلام التصوير – أسئلة ومسائل

4-1 مقدمة

تتطلب جميع القياسات النووية (سواء في مختبرات البحوث أو محطات القوى النووية أو القياسات الخاصة بالوقاية من أخطار الإشعاعات المؤينة أو غيرها) توفر الأجهزة الخاصة بالكشف عن الأنواع المختلفة من الإشعاعات النووية وتسجيلها. وتعرف هذه الأجهزة بكواشف (مكاشيف) الإشعاعات (Radiation detectors). وتستخدم هذه الكواشف، عموما، لتحديد نوع الإشعاعات وقياس كمياتها وتحديد طاقتها.

ويتوقف نوع الكاشف المستخدم على عدة عوامل أهمها:

أ- نوع الجسيمات أو الإشعاعات المطلوب الكشف عنها (جسيمات مشحونة ثقيلة أو الإلكترونات أو أشعة سينية أو إشعاعات جاما أو نيوترونات).

ب- طاقة هذه الإشعاعات.

ج- شدة الإشعاعات أو كثافة تدفقها.
د- طبيعة المكان الذي سيوضع فيه الكاشف المعين.

ويقوم مبدأ الكشف عن الإشعاعات في كثير من الكواشف على استخدام ظاهرة تأين أو إثارة الإشعاعات لذرات أو جزيئات المادة عند المرور فيها. فعند مرور الإشعاعات في مادة ما يمكن إيجاد عدد الأزواج الإلكترونية – الأيونية المتكونة نتيجة للتأيين (راجع الفصل الثالث). وقد لوحظ أن القيمة المتوسطة للطاقة اللازمة لتكوين زوج واحد $\overline{W}$ لا تعتمد على نوع الإشعاعات أو طاقتها وإنما تعتمد على نوع المادة، وأن هذه القيمة حوالي 35 إلكترون فولت بالنسبة للهواء في الظروف المعيارية. لذا، فإنه عند مرور بروتون طاقته 1ميغا إلكترون فولت في هذا الهواء فإنه ينتج في هذا الهواء عددا من الأزواج مقداره:

$$1\ \text{MeV} = 10^{6}\ \text{eV} \div 35 = 2.86 \times 10^{4}\quad \text{electron ion pairs}$$

وذلك على طول مدى هذا البروتون. ولما كانت شحنة الإلكترون أو الأيون هي 1.6×10^{-19} كولوم، فإن الشحنة الناتجة عن هذا البروتون في الهواء هي: $2.86 \times 10^{4} \times 1.6 \times 10^{-19} = 4.58 \times 10^{-15}$ كولوم. ويمكن قياس مثل هذه الشحنة بسهولة.

وأما بالنسبة للأشعة السينية وإشعاعات جاما والجسيمات المتعادلة الشحنة كالنيوترونات فهي لا تؤين المادة عند المرور فيها بطريقة مباشرة ولكنها تؤينها بطريقة غير مباشرة. فالنيوترونات يمكن أن تتفاعل مع المادة ويؤدي هذا التفاعل إلى انطلاق جسيم مشحون (بروتون أو جسيم ألفا) يعرف بالجسيم الثانوي الناتج أو النواة المرتدة (recoil nucleus) . ويحمل هذا الجسيم أو النواة جزءا كبيرا من طاقة النيوترون الساقط فيقوم بالتالي بتأين المادة وتكوين الأزواج الإلكترونية – الأيونية.

وفي حالة إشعاعات جاما أو الأشعة السينية تقوم الإلكترونات الثانوية الناتجة عن التأثير الكهروضوئي أو تأثير كومبتون أو إنتاج الأزواج بعملية تأين المادة وتكوين الأزواج الإلكترونية الأيونية فيها.

لذلك، تنتمي جميع الجسيمات المشحونة الثقيلة كجسيمات ألفا والبروتونات والديوترونات والأيونات وشظايا الانشطار النووي والنوى المرتدة والجسيمات المشحونة كالإلكترونات والبوزيترونات وغيرها والأشعة السينية وإشعاعات جاما إلى مايعرف باسم الإشعاعات المؤينة.

وهناك أنواع أخرى من الكواشف تعتمد في عملها على حدوث بعض التغيرات الكيميائية في مادتها. وبقياس هذه التغيرات الناتجة يمكن الكشف عن كمية الإشعاعات. وتتميز مثل هذه الأنواع من الكواشف بحساسية ضعيفة. لذلك، فإنها لا تستخدم إلا في المجالات الإشعاعية شديدة الكثافة مثل كواشف قياس جرعات تشعيع المنتجات المعالجة بالإشعاع والأغذية. وهناك أنواع أخرى من كواشف النيوترونات تقوم على أساس قياس النشاط الإشعاعي للمادة بعد مرور النيوترونات فيها. فمن المعروف أنه عند مرور النيوترونات في المادة يمتص منها جزء في نوي ذرات المادة، فتتحول بعض هذه الذرات إلى نظائر مشعة. وبقياس النشاط الإشعاعي لهذه النظائر المستحثة يمكن معرفة كثافة النيوترونات الساقطة.

2-4 حركة الإلكترونات والأيونات في الغازات

Motion of electrons and ions in gasses

عند مرور الإشعاعات المؤينة في الغاز تتكون أزواج إلكترونية – أيونية. وتكون كل من الإلكترونات والأيونات حرة الحركة. ونتيجة لهذه الحركة تتصادم كل من الإلكترونات والأيونات مع ذرات أو جزيئات الغاز الذي تتحرك فيه. ويتناسب متوسط المسار الحر للإلكترونات أو الأيونات في الغاز المعين تناسبا عكسيا مع عدد جزيئات الغاز في وحدة الحجوم (متوسط المسار الحر هو عبارة عن متوسط المسافة التي يتحركها الجسيم دون تصادم). ويبلغ متوسط المسار الحر في الظروف المعيارية للضغط والحرارة حوالي $10^{-5} - 10^{-4}$ سم بالنسبة لمعظم الغازات (الظروف المعيارية للضغط هي 760 مم زئبق وللحرارة هي 20° م). وعموما، يكون اتجاه حركة الإلكترونات والأيونات المتحركة عشوائيا، طالما لا تخضع لتأثير مجال كهربائي.

4-2-1 الحركة الانسياقية The drift motion

عند وجود الإلكترونات والأيونات المتكونة في الغاز تحت تأثير مجال كهربائي شدته E تتحرك هذه الإلكترونات والأيونات حركة انسياقية تحت تأثير هذا المجال، في نفس اتجاه المجال بالنسبة للأيونات الموجبة وفي اتجاه معاكس لاتجاهه بالنسبة للإلكترونات. ويقصد بالحركة الانسياقية أن الجسيم المشحون (سوء الإلكترون أو الأيون) يبدأ تحركه بتسارع تحت تأثير المجال الكهربائي لكنه سرعان ما يصطدم بذرات الغاز الموجودة في الحيز فيفقد كل طاقته التي اكتسبها أو جزءا منها، ثم يبدأ في التسارع من جديد ... وهكذا. ويمكن تحديد السرعة المتوسطة للحركة الانسياقية من العلاقة:

$$v = \mu (E / P) \qquad (4\text{-}1)$$

حيث v سرعة الحركة الانسياقية ، E شدة المجال الكهربائي، P ضغط الغاز . ويعرف المعامل μ بمعامل الحركية mobility (أي القدرة على الحركة)، وهو يتوقف على نوع الغاز كما يعتمد على كل من شدة المجال الكهربائي المؤثر E والضغط P . ويكون مقدار μ صغير عندما يكون مقدار E/P صغير، إلا أن μ يصبح ثابتا عندما يصبح مقدار E/P كبيرا . وتصل السرعة الانسياقية للإلكترونات في الغاز إلى ما يقرب من $10^{6} - 10^{7}$ سم/ثانية عندما تكون E/P في حدود 10 فولت/سم. x مم زئبق .

4—2-2 الالتصاق The attachment

هناك ظاهرة أخرى تحدث أثناء حركة الإلكترونات والأيونات في الغاز. فعند تصادم الإلكترون الحر مع جزئ متعادل (أو ذرة) من جزيئات الغاز (أو ذرات) يمكن أن يلتصق هذا الإلكترون مع الجزيء (أو الذرة) المتعادل، ويتكون بالتالي جزيء سالب. وتعرف هذه الظاهرة باسم الالتصاق.

ويعرف معامل الالتصاق h بأنه عبارة عن احتمال حدوث الالتصاق عند تصادم إلكترون واحد بجزيء متعادل. ويعتمد هذا

المعامل على نوع الغاز، وتصل قيمته بالنسبة للأكسجين وبخار الماء والغازات الهالوجينية الأخرى حوالي 10^{-3} وهي قيمة كبيرة. ويؤدي الالتصاق إلى فقد الإلكترونات الحرة من مجموعة الإلكترونات الناتجة عن التأيين. لذلك، فإنه يجب مقاومته حتى لا يفقد جزء كبير من هذه الإلكترونات. لهذا السبب يجب عدم استخدام الغازات الهالوجينية أو الأكسجين أو بخار الماء في بعض أنواع الكواشف الغازية.

3-2-4 إعادة الالتحام The recombination

عند وجود إلكترون سالب وأيون موجب بالقرب من بعضهما البعض فإنهما يمكن أن يعيدا التحامهما، مكونين بذلك ذرة أو جزيئا متعادلا. وتعرف هذه الظاهرة باسم إعادة الالتحام (recombination) . ويتناسب معدل إعادة الالتحام (أي عدد مرات إعادة الالتحام في وحدة الحجوم وفي وحدة الزمن) تناسبا طرديا مع تركيز كل من الإلكترونات n_- والأيونات n_+ ويمكن تحديده من العلاقة:

$$dn_+/dt = dn_-/dt = -\alpha n_+ n_- \qquad (4\text{-}2)$$

حيث α معامل ثابت يعرف باسم معامل إعادة الالتحام، ويتراوح مقداره للهواء بين 10^{-7} ، 10^{-10} ، وذلك عندما تكون الشحنات السالبة والموجبة موزعة توزعا متجانسا في الحيز الذي تشغله. أما إذا كانت الشحنات مركزة في منطقة ما (كما يحدث عند تكون الأزواج الإلكترونية الأيونية على طول أثر(مسار) الجسيم المشحون يزداد معامل إعادة الالتحام زيادة واضحة.

وتجدر الإشارة إلى أن حركية الإلكترونات أكبر بكثير من حركية الأيونات. كذلك، فإن حركية الإلكترونات، لا تؤدي إلى حدوث تغير ملموس في ضغط الغاز أو في شدة المجال الكهربائي.

3-4 التيار الإلكتروني والأيوني في الغازات
The electron and ion currents in gasses

يمثل انتقال الإلكترونات والأيونات في الغـــاز انتقـــالا للشـــحنة الكهربائية. وهذا بدوره هو بمثابة مرور تيار كهربي شـــدته I يمكـــن تحديده من العلاقة التالية:

$$I = I_+ + I_- \qquad (4\text{-}3)$$

حيث: I_+ ، I_- ، هما عبارة عن شدة التيار الأيوني والإلكتروني على الترتيب.

وعموما، يمكن أن يمر تيار كهربائي في الغاز حتى فـــي حالـــة عدم وجود مجال كهربائي، وذلك بسبب ظاهرة الانتشـــار (diffusion) ، حيث تنتشر كل من الإلكترونات والأيونات من الوسط الأكثر تركيزا إلى الوسط الأقل تركيزا. ويتكون نتيجة لهذا الانتشار تيار كهربـــائي شـــدته للأيونات هي:

$$I_{D+} = - e\, D_+ \,(dn_+ /dx) \qquad (4\text{-}4)$$

وشدته للإلكترونات هي:

$$I_{D_} = - e\, D_ \,(dn_- /dx) \qquad (4\text{-}5)$$

حيث: D_+ ، $D_$ معامـــل الانتشـــار للأيونـــات وللإلكترونـــات بالترتيب. أما (dn_+ /dx) فهو معدل تغير تركيز الأيونات بتغير المسافة، $(\underline{dn_-} /dx)$ فهو معدل تغير تركيز الإلكترونات بتغير هذه المسافة. بتغير المسافة .

أما في حالة وجود مجال كهربائي شدته E فإنـــه إلـــى جانـــب الحركة الانتشارية تتحرك كل من الأيونات والإلكترونات حركة انسياقية تحت تأثير هذا المجال بالإضافة إلى تلك الحركة الانتشارية. وينتج عن هذه الحركة الانسياقية مرور تيار كهربائي شدته لوحدة المساحات (أي كثافته) للأيونات هي:

$$I_{E+} = e\, n_+\, v_+ \qquad (4\text{-}6)$$

وللإلكترونات هي:

$$I_{E_} = - e\, n_\, v_ \qquad (4\text{-}7)$$

حيث v_+ ، v_- هما سرعتا الانسياق لكل من الأيونات والإلكترونات بالترتيب.

بذلك، يمكن إيجاد شدة التيار الكلي الناتج عن كل من الانتشار والمجال الكهربائي لكل من الإلكترونات والأيونات، وذلك بجمع مركباته الأربعة المختلفة (من 4–4 حتى 4–7)، أي أن:

$$I = e\,(n_+ v_+ + n_- v_- - D_+ (dn_+/dx) + D_- (dn_-/dx)) \qquad (4\text{-}8)$$

4–4 الكواشف الغازية The gas detectors

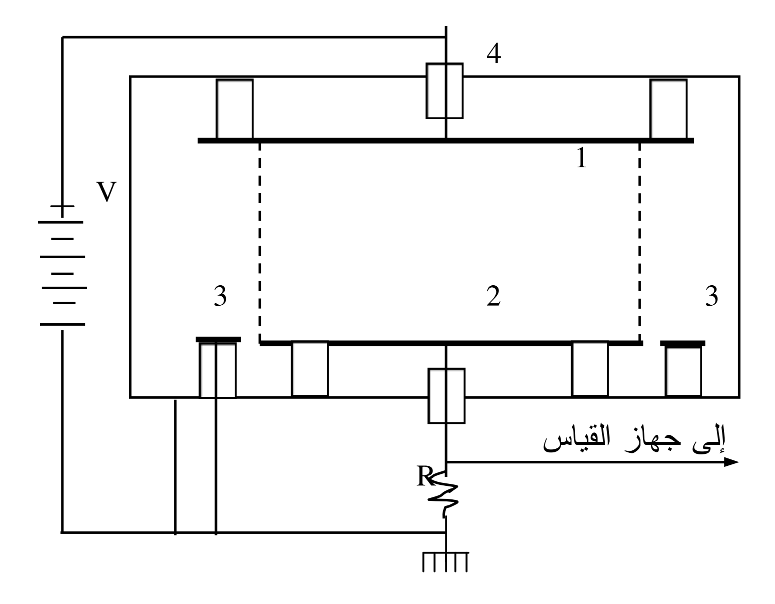
يقوم مبدأ عمل الكواشف الغازية على تجميع الشحنات الكهربائية (الإلكترونية والأيونية) الناتجة عن تأين ذرات أو جزيئات الغاز عند مرور الإشعاعات المؤينة فيه. وبقياس الشحنة الكهربائية الناتجة أو التيار الناتج عنها يمكن الكشف عن مرور الإشعاعات في الغاز. وتنقسم الكواشف الغازية إلى ثلاثة أنواع رئيسة هي:

- غرفة التأين
- العدادات التناسبية
- عدادات غايغر – ميولر.

4–4–1 غرفة التأين The ionization chamber

هي عبارة عن كاشف غازي (gas detector) للإشعاعات المؤينة. ويقوم عملها على تجميع الأزواج الإلكترونية – الأيونية الناتجة عن هذه الإشعاعات في شكل تيار كهربي وقياس هذا التيار أو جهد النبضات الناتجة عنه. وتتكون غرفة التأين عموما من قطبين فلزيين موصلين بطرفي منبع جهد عال. وقد يتخذ القطبان أشكالا مختلفة، ولكن في معظم الأحيان يكون القطبان على شكل ألواح مستوية. ويوضع القطبان داخل إناء مفرغ من الهواء الجوي ويملأ بالغاز المطلوب حتى ضغط معين. ويتوقف ضغط الغاز والأبعاد الهندسية للقطبين عموما على نوع الجسيمات المطلوب الكشف عنها وعلى طاقاتها. ويستخدم في بعض غرف التأين الهواء الجوي العادي. ويبين شكل (4–1) رسما تخطيطيا

لغرفة تأين ذات قطبين مستويين، موصلة بمنبع الجهد العـــالي الـــلازم لتغذية أقطابها. ويعرف القطب المتصل بجهاز قياس التيار بـــالمجمع أو المصعد أو الأنود (The anode). ويختلف الجهد الواقع على هذا القطـــب باختلاف التيار المار فيه. أما القطب الآخر فيقع عادة تحت تأثير جهـــد عال (جهد المنبع) ويعرف بقطب الجهد العالي. يثبت القطبان باســـتخدام مواد عازلة كهربيا في الإناء الخارجي للغرفة. ويستخدم في العديد مـــن غرف التأين حلقتان تعرفان بالحلقتين الحارستين (guard rings). ويمكـــن تحقيق الحلقتين الحارستين بفصل الجزأين الطرفيين من القطب المجمـــع عن القطب نفسه، بحيث لا تكون المسافة الفاصـــلة كبيـــرة. ويجـــب أن يكون جهد الحلقة الحارسة القريبة من المجمع قريبا من جهـــد القطـــب المجمع. والغرض من هاتين الحلقتين الحارستين هو تشـــكيل المجـــال الكهربي بالقرب من أطراف القطب المجمع، بحيث تكون خطوط قـــوى المجال الكهربي بين قطب الجهد العالي والقطب المجمع عند الطـــرفين خطوطا مستقيمة وموازية للخطوط التي في الوسط. ويؤدي ذلـــك إلـــى تحديد حجم الغـــرفة التي تجـــمع منها الشحنات الكهربية تحـــديدا دقيقا



شكل (4-1): رسم تخطيطي لغرفة تأين ذي قطبين مستويين

1- قطب الجهد العالي 2- المجمع (الأنود)
3- حلقة حراسة 4- عازل

ويعرف هذا الحجم (والمبين في الشكل 4-1 بين الخطين المتقطعين) بالحجم الفعال أو الحجم الحساس للغرفة.

وعند مرور الإشعاعات بين قطبي الغرفة تؤدي هذه الإشعاعات إلى تأيين الغاز ويتم تجميع الشحنات الكهربائية الناتجة عن التأيين داخل الحجم الفعال على المجمع (حيث أن الأيونات والإلكترونات المتكونة خارج هذا الحجم تتجمع على الحلقات الحارسة وتمر مباشرة إلى الأرض). وعند إهمال الانتشار وإعادة الالتحام يكون التيار الناتج عن تجميع الشحنات من الحجم الفعال على المجمع هو:

$$I_S = e \int N_0(\tau)\, dt \qquad (4\text{-}9)$$

حيث $N_0(\tau)$ هو عدد الأزواج الناتجة في وحدة الحجم في الثانية الواحدة. ويؤخذ التكامل بالنسبة للحجم الفعال كله. وهذه العلاقة صحيحة إذا كان $N_0(\tau)$ ثابتا بالنسبة للزمن (أي أن عدد الجسيمات التي تدخل الغرفة ثابتا بالنسبة للزمن). وتعني هذه العلاقة أن الشحنات التي تتكون نتيجة التأين في الحجم الفعال يتم تجميعها بالكامل على المجمع ويعرف التيار في هذه الحالة باسم تيار التشبع I_S (saturation current).

ويمكن إهمال كل من تيار الانتشار وإعادة الالتحام عندما تكون شدة المجال بين الأقطاب (أي فرق الجهد بينها) كبيرة . عندئذ تصبح المعادلة (4-9) صحيحة. أما إذا كان فرق الجهد صغيرا أو كان الغاز المستخدم من الغازات الهالوجينية أو الأكسجين أو بخار الماء فإن إعادة الالتحام تلعب دورا مهما وخصوصا بالنسبة للغازات الهالوجينية. لذلك، فإنه يجب أن يوضع التيار المفقود نتيجة لإعادة الالتحام أو نتيجة للالتصاق في الاعتبار. وبالنسبة لغرف التأين ذات الأقطاب المستوية فإنه يمكن حساب التيار المفقود $(\Delta I_s)_r$ بسبب إعادة الالتحام من العلاقة التالية:

$$(\Delta I_s)_r = - I_S (\alpha N_0 (\tau) d^2) / \sigma v_+ v_- \qquad (4-10)$$

حيث I_S هو تيار التشبع، d هي المسافة بين القطبين و v_+ ، v_- هما سرعتا الانسياق لكل من الأيونات والإلكترونات بالترتيب.

أما بالنسبة للانتشار فيمكن أن يؤدي إلى فقد نسبة أخرى من التيار وذلك لأن الانتشار يمكن أن يحدث في أي اتجاه. ويمكن تحديد قيمة الجزء المفقود $(\Delta I_S)_{dif}$ بسبب الانتشار من العلاقة:

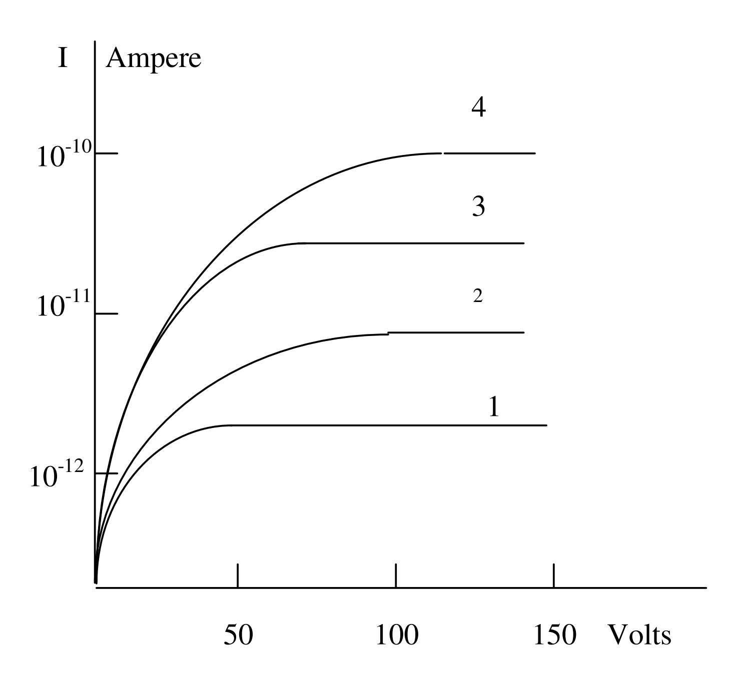
$$(\Delta I_S)_{dif} = - I_s (\varepsilon K T / e V) \qquad (4-11)$$

حيث: K ثابت بلتسمان، T درجة الحرارة المطلقة، V فرق الجهد بين القطبين، εε عبارة عن النسب بين الطاقة المتوسطة للأيونات في حالة وجود المجال وبدونه. ويوضح شكل (4–2) العلاقة بيت التيار المتجمع I وفرق الجهد V بين القطبين. وتعرف هذه العلاقة باسم المميزة الفولت – أمبيرية لغرفة التأين. ويعتمد شكل هذه المميزة على الأبعاد الهندسية للغرفة وعلى نوع الغاز المستخدم وضغطه ونوع الإشعاعات المارة في الغرفة وشدتها (أي كثافتها). ويتضح تأثير هذه العوامل من شكل (4–2) الخاص بغرفة تأين أسطوانية الشكل والذي يوضح المميزة الفولت أمبيرية لنوعين من الغاز عند شدتين مختلفتين لإشعاعات جاما. وفي حالة البروتونات والجسيمات المشحونة الثقيلة تلعب إعادة الالتحام دورا أكثر لأن التأين النوعي لهذه الجسيمات كبير للغاية، وبالتالي لا يحدث التشبع إلا عند جهود أعلى.

4–4–2 خصائص غرفة التأين

تستخدم جميع غرف التأين عند قيم الجهود التي تحقق تيار التشبع وهو ما يعرف بالعتبة(plateau). ونظرا لبساطتها وسهولة تشغيلها فإنه يمكن تصميم غرف بأشكال وأحجام مختلفة واستخدامها لقياس جميع أنواع الإشعاعات، بما في ذلك إشعاعات جاما والنيوترونات. وعموما يمكن استخدام غرف التأين لقياس القيمة المتوسطة للتيار الناتج عن عدد من الجسيمات أو لقياس نبضة التيار (أو الجهد) الناتج عن مرور جسيم واحد. ويعرف هذا النظام الأخير لتشغيل غرفة التأين بالنظام النبضي،

وهو غالبا ما يستخدم في قياس الشدة الإشعاعية الضعيفة أو عند قيـــاس طاقة الجسيمات أو الإشعاعات. وعموما، يمكن استخدام غازات مختلفة



شكل (4–2): المميزة الفولت أمبيرية لغرفة التأين

1– هليوم وكثافة إشعاعات صغيرة 2– هواء وكثافة صغيرة

3– هليوم وكثافة إشعاعات كبيرة 4– هواء وكثافة كبيرة

داخل الغرفة. لكن بالنسبة للغرف النبضية يفضـــل اســـتخدام الغـــازات الخاملة تحت ضغوط معينة، وذلك لضمان تجميع الإلكترونات وتكـــوين النبضة بسرعة وفي أقصر زمن ممكن، وذلك حتى تتم عملية التســـجيل خلال زمن قصير وتصبح الغرفة جاهزة لاستقبال جسيم آخر وتسجيله.

وعند تصميم غرفة التأين للأغراض المختلفة يجب توجيه عناية خاصة إلى نوعية العازلات المستخدمة لعزل الأقطاب عن بعضها وعن جسم الغرفة وخاصة العازل المستخدم لتثبيت وعزل المجمع. فيجب أن

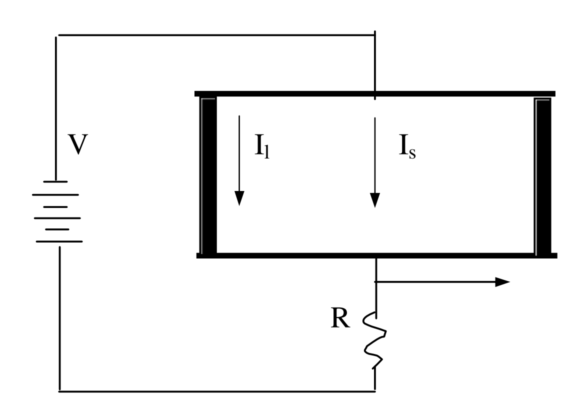
تكون مادة العازل ذات مقاومة عالية جدا. ويرجع السبب في ذلك إلى أن التيار الناتج عن مرور الجسيم يكون صغيرا للغاية. فإذا كانت مقاومة العازل بين القطبين غير كافية فإنه يمكن أن يتسرب بين القطبين تيار يعرف باسم تيار التسرب (leakage current) قيمته هي:

$$I_l = V / R_c$$

حيث: V جهد المنبع، R_C مقاومة العازل (شكل 4-3). فإذا كانت مقاومة العازل في حدود 10^{13} أوم وفرق الجهد بين القطبين 100 فولت يمر تيار تسرب I_l في العازل مقداره:

$$I_l = 100 / 10^{13} = 10 \quad \text{pico-Ampere}$$

وهذا تيار كبير جدا بالنسبة للتيار الناتج عن الجسيم النووي I_s . لذلك، يجب أن يكون العازل المستخدم ذا مقاومة عالية، بحيث لا تقل عن $10^{16} - 10^{17}$ أوم.



شكل (3-4)
تيار التسرب I_l في غرفة التأين

ويمكن أن يزداد تيار التسرب حتى مع استخدام عازل ذي مقاومة عالية وذلك خلال سطح العازل بسبب امتصاص السطح لبخار الماء أو لأي شوائب أخرى. لذا ،يجب المحافظة على سطح العازل نظيفا وجافا وخاليا تماما من أية خدوش مهما كانت صغيرة.

كذلك، تلعب الحلقات الحارسة دورا آخر بالإضافة إلى دورها الرئيسي (وهو تشكيل خطوط القوى لتحديد الحجم الفعال). فهذه الحلقات تمنع الإلكترونات والأيونات التي تتكون على جانبي الحجم الفعال من التجمع على العازل حتى لا تؤثر هذه الشحنات على شكل المجال في الحجم الفعال وحتى لا تؤدي إلى زيادة تيار التسرب.

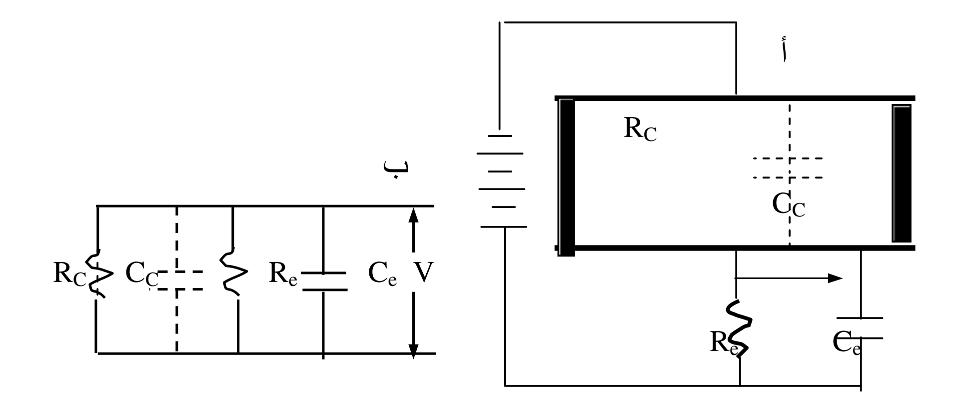
4-4-3 منحنى الاستجابة الديناميكي لغرفة التأين

يمكن النظر إلى أي غرفة تأين من الناحية الإلكترونية على أنها عبارة عن مقاومة R_C (مقاومة العازل بين القطبين). ولما كان القطبان يشكلان سطحين متوازيين فإنه يمكن اعتبارهما مكثفا سعته C_C (كالمبين على شكل 4-4أ بالخط المتقطع). وهكذا، تتميز أية غرفة تأين بمقاومة داخلية R_C وسعة ذاتية C_C. كذلك، فإن الجهاز المستخدم لقياس التيار يحتوي في مدخله على مقاومة داخلية R_e وسعة C_e شكل(4-4أ). وجميع هذه العناصر متصلة مع بعضها على التوازي (شكل 4-4ب). لذا يمكن اعتبار أن السعة الكلية C للغرفة وجهاز القياس هي:

$$C = C_C + C_e$$

والمقاومة الكلية لهما هي:

$$R = R_C R_e / (R_C + R_e)$$



شكل (4-4)
الدارة المستخدمة لقياس التيار الناتج من غرفة التأين

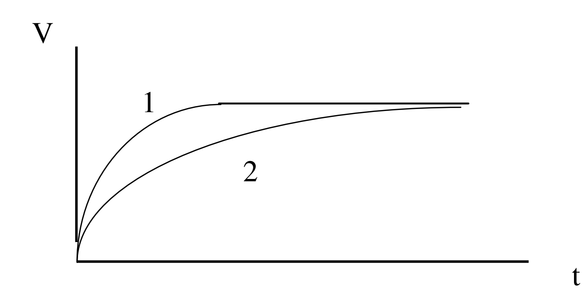
لذلك، ينتج عن تيار الغرفة فرق جهد v على مدخل الجهاز يمكن تحديده من قانون كيرشوف كالآتي:

$$RI = V + RC\,(dv/dt) \qquad (4\text{-}12)$$

وبحل هذه المعادلة التفاضلية يمكن إيجاد كيفية تغير الجهد على مدخل الجهاز كدالة من الزمن حيث نجد أن الجهد V عبارة عن:

$$V = RI\,(1 - e^{-t/RC}) \qquad (4\text{-}13)$$

وتعرف الكمية RC بثابت الزمن للدارة. وكلما كان هذا الثابت RC صغيرا وصل الجهد إلى قيمة التشبع بسرعة (المنحنى1 شكل4-5). أما عند زيادة قيمة RC يصل الجهد إلى قيمة التشبع بعد زمن أكبر(المنحنى2 على نفس الشكل).



شكل (4-5)
منحنى الاستجابة الديناميكي لغرفة التأين

4-4-4 استخدام غرف التأين للكشف عن الإشعاعات المختلفة

يمكن تصميم غرف تأين للكشف عن الأنواع المختلفة من الإشعاعات المؤينة. ويتوقف حجم الغرفة ومواصفاتها وضغط الغاز

بداخلها على نوع الإشعاعات المطلوب الكشف عنها وعلى طاقة هذه الإشعاعات. لذا، فإنه يمكن تقسيم غرف التأين من حيث نوع الإشعاعات إلى الآتي:

أ- غرف التأين لجسيمات ألفا والجسيمات المشحونة الثقيلة

حيث أن القدرة الاختراقية لجسيمات ألفا والجسيمات المشحونة الثقيلة الأخرى صغيرة، فإن هذه الجسيمات تمتص بالكامل في جدار الغرفة ولا تمر إلى داخلها. لذلك، فإنه يجب عمل نافذة رقيقة في جدار الغرفة تسمح بدخول هذه الجسيمات من خلالها. وتصنع النافذة عموما من مادة خفيفة كالبريليوم أو المواد العضوية الخفيفة، وتكون في شكل غشاء رقيق جدا (أقل من 1 ميللي غرام/سم^2) حتى لا يمتص الغشاء جزءا كبيرا من طاقة الجسيمات، على أن يتحمل هذا الغشاء فرق الضغط الواقع عليه والناتج عن اختلاف ضغط الغاز داخل الغرفة والضغط الجوي خارجها.

ويستخدم هذا النوع من الغرف للكشف عن جسيمات ألفا، خاصة الناتجة عن تلوث أسطح الأجهزة والمعدات بالمواد المصدرة لجسيمات ألفا. وتتميز هذه الغرف بحساسيتها حيث يمكنها الكشف عن التلوث الضعيف الذي لا يزيد نشاطه الإشعاعي على جسيم واحد في الدقيقة.

مثال:

غرفة تأين غازية تدريجها الأصغر يتراوح بين صفر، 500 جسيم/الدقيقة. فإذا علمت أن نافذتها تمتص 20 % من طاقات جسيمات ألفا وإذا كانت طاقة هذه الجسيمات 5 ميغا إلكترون فولت، أحسب مقدار التيار الناتج عنها عندما يكون المؤشر في منتصف التدريج.

الحل:

عندا يكون المؤشر في منتصف التدريج يكون عدد جسيمات ألفا هو $500 \div 2 = 250$ جسيما في الدقيقة.

مقدار الطاقة المفقودة في النافذة من كل جسيم هو:

$$\Delta E = 5 \times 20 / 100 = 1 \ \text{MeV}$$

.: مقدار الطاقة المفقودة في تأيين الغاز لكل جسيم هو:

$$E_1 = 5 - 1 = 4 \ \text{MeV}$$

.: مقدار شدة التيار I الناتج هو عبارة عـن الشـحنة المتولـدة مقسومة على زمن تولدها (1 دقيقة = 60 ثانية، أي أن:

$$I = dQ / dt$$

$$= 250 \times 4\times10^{6} \times 1.6\times10^{-19} / 35 \times 60$$

$$= 7.6 \times 10^{-14} \ \text{Ampere} = 7.6 \times 10^{-2} \ \text{picoAmpere}$$

ب- غرف التأين لجسيمات بيتا

من المعروف أن قدرة جسيمات بيتا على الاختراق كبيرة حيـث يصل مداها في الهواء الجوي إلى عدة أمتار، (حوالي 5 متر) عنـدما يغطي طيفها مدي طاقة يبدأ من الصفر وحتى حوالي 1 ميغا إلكتـرون فولت. لذلك، فإن ضغط الغاز داخل الغرفة يجب أن يكون كبيرا حتـى تتوقف هذه الجسيمات بالكامل داخل الغرفة. وللسبب نفسه فإنه تسـتخدم نوافذ ذات سمك أكبر لتتحمل فرق الضغط داخل الغرفة وخارجها.

ج- غرف التأين لإشعاعات جاما

نظرا للقدرة الاختراقية الفائقة لإشعاعات جاما فإنه لا يلزم وجود نافذة لغرف التأين الخاصة بالكشف عن هذه الإشعاعات. ونظرا لصـغر احتمال حدوث كل من التأثير الكهروضوئي وتأثير كومبتـون أو إنتـاج الأزواج داخل الغاز فإن السطح الداخلي للغرفة يبطن بطبقة رقيقة مـن الرصاص (لكبر عدده الذري)، وذلك ليزيد من احتمال حدوث أي من هذه العمليات الثلاثة في الرصاص وانطلاق الإلكترون إلى داخل الغـاز للقيام بالتأيين. إلا أن سمك هذه الطبقة يجـب أن يكـون صـغيرا وإلا امتصت الإلكترونات المنبعثة من العمليات الثلاثة فيه. وجدير بالذكر أن جزءا قليلا من إشعاعات جاما هو الـذي يـؤدي إلـى انطـلاق هـذه

الإلكترونات. أما الجزء الآخر فيمر من الغرفة دون أن يتـــرك أي أثـــر ولا يسجل فيها. لذلك، تتميز جميع أنواع كواشف إشعاعات جاما بمعامل مهم يعرف باسم الكفاءة الذاتية للكاشف.

الكفاءة الذاتية للكاشف The detector intrinsic efficiency

هي عبارة عن نسبة عدد الإشعاعات المسجلة في الكاشـــف إلـــى العدد الكلي للإشعاعات الساقطة عليه. وتتناسب كفـــاءة غرفـــة التـــأين الخاصة بالكشف عن إشعاعات جاما تناسبا عكســـيا مـــع طاقـــة هـــذه الإشعاعات. كذلك، تتوقف كفاءة الكاشف على حجم الغرفة وعلى نـــوع الغاز المستخدم فيها وضغطه، وعلى نوع المادة المبطنة للغرفة.

وتتراوح الكفاءة الذاتية لغرف التأين لإشعاعات جاما بـــين عـــدة أجزاء من مائة ألف إلى عدة أجزاء من المائة.

د- غرف التأين للنيوترونات

عند مرور النيوترونات في المادة فإنه لا ينتج عنها أي تأين. لـــذا فإنه من الضروري إيجاد وسيلة لتوليـــد الجســـيمات المشـــحونة بفعـــل النيوترونات، حيث تؤدي هذه الجسيمات المشحونة إلى عمليـــة التـــأين. ولهذا الغرض يوضع داخل الكاشف النيوتروني مادة من المـــواد التـــي يمكن أن ينطلق منها بروتونات أو جسيمات ألفا نتيجة حدوث تفـــاعلات نووية مختلفة بينه وبين النيوترونات الساقطة. لذلك، يستخدم في العديـــد من غرف التأين الخاصة بالكشف عن النيوترونات غاز ثالـــث فلوريـــد البور BF_3 . فعند سقوط النيوترونات على هذا الغاز يتفاعل بعضها مـــع البور وينتج عن ذلك انطلاق جسيمات ألفا طبقا للتفاعل التالي:

$$^{1}_{0}n + ^{10}_{5}B \longrightarrow ^{7}_{3}Li + ^{4}_{2}\alpha$$

ويقوم جسيم ألفا بتأيين ذرات أو جزيئات الغاز. وجدير بالـــذكر أن كفاءة الكاشف النيوتروني تكون صغيرة وتتوقف على عوامل كثيـــرة منها طاقة النيوترونات وكثافة الغاز وحجم الغرفة. ولا تستخدم نوافذ في

الكواشف النيوترونية بسبب قدرة النيوترونات الفائقة على اخترق جـــدار الغرفة.

5-4-4غرف التأين النبضية pulse-type ionization chamber

تستخدم غرف التأين النبضية لدراسة كل جسيم على حـــدة، أي عند تعاقب الجسيمات والإشعاعات الساقطة الواحد تلو الآخـــر بفـــارق زمني يسمح بالانتهاء من تسجيل الجسيم السابق. لذلك، يجب أن يكـــون زمن استمرار النبضة الكهربية (pulse-duration) الناتجة عـــن الجســـيم صغيرا جدا، وذلك للتمييز بين الجســـيمات المتتابعـــة. ويعتمـــد زمـــن استمرار النبضة على ثابت الزمن RC للغرفة ولجهاز القيـــاس، وعلـــى المسافة بين القطبين. ومن الواضح أن زمن استمرار النبضة وجهـــدها يعتمدان اعتمادا كبيرا على مكان حدوث التأين بالنسبة للمجمع، أي على وضع واتجاه أثر الجسيم في الغرفة. فإذا كان الأثر قريبا مـــن المجمـــع فهذا يعني وصول الإلكترونات بسرعة إلى هذا القطب وبالتالي عدم فقد أي منها أثناء الانتقال، مما يؤدي إلى ظهور نبضة جهـــد عاليـــة علـــى المخرج. أما إذا مر جسيم آخر بالطاقة نفسها بعيدا عن المجمـــع فـــإن الإلكترونات الناتجة عن طول أثره تستغرق وقتا طويلا للوصـــول إلـــى المجمع ويضيع جزءا منها بسبب التصادمات مع جزيئات الغـــاز، ممـــا يؤدي إلى إضعاف التيار الكهربائي وبالتالي نبضـــة الجهـــد الخارجـــة. وبالإضافة إلى ذلك، فإن جهد النبضة وزمن استمرارها يتوقفـــان علـــى زمن وصول كل من الإلكترونات إلى المجمع والأيونات إلى قطب الجهد العالي. ولما كانت حركة الإلكترونات سريعة (حيث تبلغ ســـرعتها فـــي الغرفة حوالي 10^{-6}م/الثانية)، وحركة الأيونات بطيئـــة (حيـــث تبلـــغ سرعتها حوالي 10^{3}م/الثانية) فإن الجهد الناتج من المركبة الإلكترونيـــة يصل إلى أقصى قيمة له خلال زمن قصير (في حدود 10^{-6} ثانية). أما الجهد الناتج عن المركبة الأيونية فيصل إلى أقصى قيمة له خلال زمـــن كبير (حوالي 10^{-3} ثانية). وبالنسبة للغرفة ذات الأقطاب المستوية يمكن

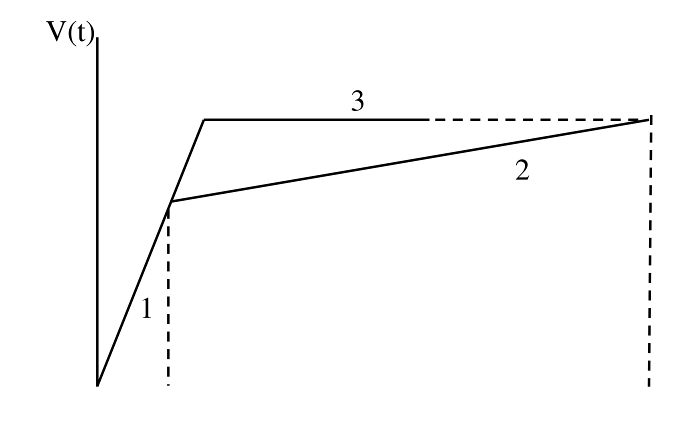
إثبات أن جهد المركبة الإلكترونية أو الأيونية كدالة من الزمن t يمكــن تحديده من العلاقة:

$$V(t) = n e v t / C d$$

حيث n عدد الإلكترونات أو الأيونـــات المتكونـــة، v الســـرعة الانسياقية للإلكترونات أو الأيونات C السعة الداخلية للغرفة، d المســـافة بين القطبين. ويبين شكل (4–6) كيفية تغير جهد كــل مــن المركبــة الأيونية والمركبة الإلكترونية لغرفة التأين كدالة من الزمن.

وتعكس هذه العلاقة اختلاف جهد النبضة بــاختلاف الســـرعات الانسياقية للإلكترونات والأيونات. لذلك، تعتبر غرفة التأين مــن هــذا النوع بطيئة. ويمكن عمل أنواع أخرى سريعة، وذلك باســتخدام شــبكة فلزية تثبت بين المجمع وقطب الجهد العالي، وتكون أقرب إلى المجمــع (شكل 4–7). ويكون جهد هذه الشبكة واقعا بين الصفر (جهد المجمــع) والجهد العالي V ويؤدي إدخال هذه الشبكة إلى خفض الســعة C بـــين مسار الجسيم والقطب المجمع. وبالتالي، تصبح العلاقة بين جهد المركبة الإلكترونية وبين الزمن كالمبين بالمنحنى (3) شكل (4–6)

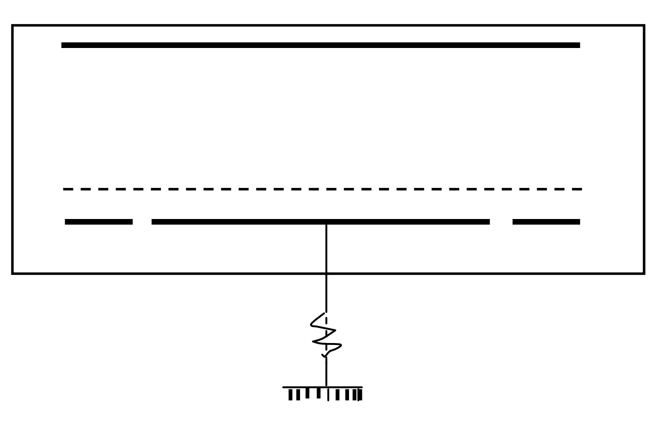
وهكذا يجب أن تحتوي غرف التأين النبضية على شبكة، ويجب أن تملأ الغرف بغاز من النوع الذي لا تتكون فيه أيونات سالبة. لذلك، يفــضل استخدام الغازات الخاملة في هذا النوع من الغرف. كذلك، يجب



10^{-6} 10^{-3} t

شكل (4−6)

تغير جهد كل من المركبة الإلكترونية (1) والأيونية (2) كدالة من الزمن t
وتغير جهد المركبة الإلكترونية (3) كدالة من الزمن بعد وضع الشبكة الفلزية



شكل (4−7)

الشبكة الفلزية في غرفة التأين

أن يكون فرق الجهد بين القطبين كبيرا (عند نهاية العتبة في شكل 4−6) وذلك كي تكون السرعة الانسياقية للإلكترونات ثابتة ولا تعتمد على فرق الجهد بين القطبين. ويستخدم غاز الأرجون في معظم هذه الغرف. ويضاف إليه عادة نسبة صغيرة من غاز ثاني أكسيد الكربون (حوالي5%)، وذلك لضمان بقاء السرعة الانسياقية ثابتة وعدم زيادتها بزيادة فرق الجهد بين القطبين.

وتجدر الإشارة إلى أن غرف التأين النبضية لا تستخدم عموما للكشف عن جسيمات بيتا وذلك بسبب صغر التأين النوعي S لهذه

الجسيمات، مما يؤدي إلى إنتاج عدد قليل من الإلكترونات نتيجة جسيم بيتا واحد، وبالتالي يكون التيار الناتج ضعيفا ويصعب تكبيره وتسجيله.

6-4-4 القدرة التحليلية للطاقة Energy resolving power

من أهم خصائص غرف التأين النبضية الخاصية المعروفة باسم القدرة التحليلية للطاقة (energy resolving power). فعند سقوط عدد جسيمات ألفا ذات طاقة واحدة على نافذة الغرفة فإن هذه الجسيمات تعبر النافذة إلى داخل الغرفة باختلاف طفيف في طاقاتها، وذلك بسبب حدوث تبعثر في طاقة الجسيمات المختلفة. وفضلا عن ذلك فإنه حتى في حالة دخول هذه الإشعاعات (مثل إشعاعات جاما) إلى الغرفة بالطاقة نفسها فإن كل فوتون يطلق إلكترونا أو زوجا إلكترونيا بوزترونيا يكون بدوره عددا مختلفا من الأزواج الإلكترونية الأيونية، وذلك لأن عملية التأين عملية إحصائية بحتة. كذلك، فإنه عند انتقال الإلكترونات إلى المجمع يمكن أن يضيع بعضها بسبب التصادمات مع ذرات الغاز ومع الأيونات الموجبة، وبالتالي فإن الجسيمات ذات الطاقة الواحدة يمكن أن تنتج نبضات كهربية يختلف تيارها (وبالتالي جهدها) اختلافا طفيفا. ويقال أنه حدث توزع للطاقة. لذلك، فإنه عند تسجيل عدد كبير من الجسيمات ذات طاقة واحدة E_0 يحدث توزع في طاقاتها ويظهر طيفها (spectrum) على صورة قمة كالمبينة في شكل (4–8). وتعرف القيمة ΔE باسم العرض الكامل عند منتصف الارتفاع full width at half-maximum (FWHM). وبمعرفة قيمة التوزع في الطاقة ΔE وطاقة الجسيمات الساقطة E_0 تحدد القدرة التحليلية r للكاشف، كنسبة مئوية، كالآتي:

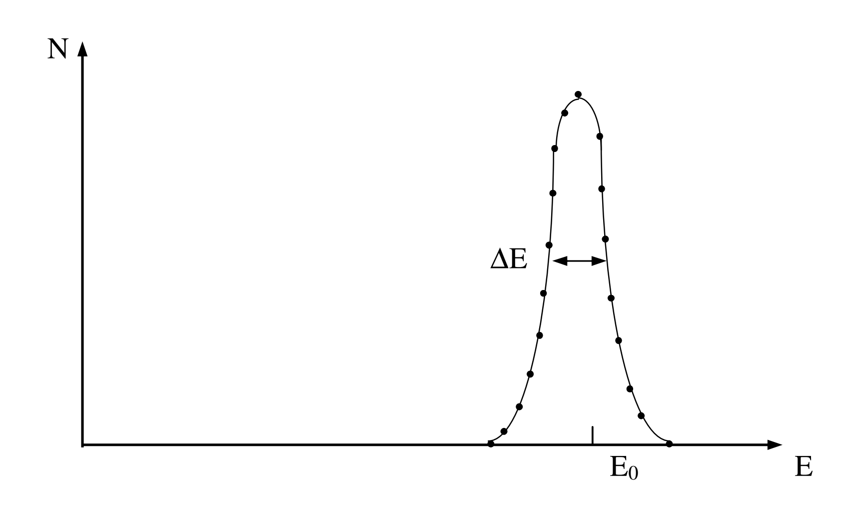
$$r = \Delta E \ / E_0 \times 100\% \qquad (4\text{-}15)$$

وتعتمد قيمة التبعثر ΔE عموما، على طاقة الجسيمات الساقطة حيث تزداد بزيادتها كما تعتمد ΔE على عوامل أخرى كثيرة مثل سمك النافذة وضغط الغاز وحجم الغرفة وغيره. لذلك، تتفاوت القدرات التحليلية للغرف المختلفة. وتتراوح القدرة التحليلية للطاقة لغرف التأين بين حوالي 0.3 % ، 7 % وذلك تبعا للحجم وشكل النافذة وفرق الجهد والسعة الداخلية وغيره . ومعرفة القدرة التحليلية للكاشف أمر مهم جدا. فعند وجود جسيمات ذات طاقات مختلفة فإنه يمكن فصل هذه الطاقات

عن بعضها باستخدام الكاشف المعين إذا كان الفرق في الطاقة أكبر من ΔE. أما إذا كان الفرق في الطاقة أقل من ΔE فإنه لا يمكن فصل هـــذه الطاقات عن بعضها وتتداخل قممها.

5-4 العدادات التناسبية The proportional counters

عند زيادة فرق الجهد بين قطبي غرفة التأين إلى قيم عالية يبـــدأ التيار في الزيادة السريعة فوق قيم التشبع I_S . ويعود السبب في ذلك إلى



شكل (4-8)
توزع طاقة جسيمات ذات طاقة واحدة

أن الإلكترونات الناتجة عن التأين والواقعة تحت تـــأثير فـــرق الجهـــد تكتسب طاقة حركية تتناسب مع مقدار فرق الجهد الذي تجتازه. وعنـــد زيادة فرق الجهد تزيد الطاقة التي تكتسبها هذه الإلكترونات فتصـــبح (الإلكترونات) قادرة على تأيين ذرات جديدة للغـــاز، وبالتـــالي تكـــوين مجموعة ثانوية من الأزواج الإلكترونية – الأيونية، تنضم إلى المجموعة الأولية التي نتجت بفعل الجسيم النـــووي. وتســـتمر إلكترونـــات كلتـــا المجموعتين في الحركة بتأثير الجهد وبالتالي تكتسب طاقة جديدة فتؤدي

إلى مرحلة جديدة من التأين الثانوي. وهكذا، فإن الإلكترونات الناتجة من التأين الأولي بفعل الجسيم النووي يتبعها عدة مراحل تأين ثانوي تؤدي إلى مضاعفة عدد لإلكترونات. وهذه المراحل المتتابعة من التأين الثانوي الناتج عن الجهد الكبير تختلف اختلافا تاما عن مفهوم التأين الثانوي الناتج عن جسيمات بيتا ذات الطاقة العالية والذي يحدث دون النظر لشدة المجال. وينتج عن تتابع التأين تكاثر هائل لعدد الإلكترونات. وبالإضافة إلى ذلك فعند تصادم الإلكترونات المعجلة بجزيئات الغاز أو عند حدوث إعادة التحام بين الأعداد الهائلة من الإلكترونات والأيونات تنطلق فوتونات (أشعة سينية) نتيجة لإثارة هذه الجزيئات عند التصادم. ويمكن أن تؤدي هذه الفوتونات إلى تحرير عدد آخر من الإلكترونات من سطح قطب الجهد العالي أو من جزيئات الغاز التي يكون جهد تأينها صغيرا (في حالة وجود خليط من الغازات). وبذلك، يمكن أن تشترك الفوتونات في عملية التأين الثانوي. وبالتالي تنتشر عملية التأين في الحجم الكلي للغاز، ويحدث ما يشبه التفريغ الكهربائي للغاز (gas discharge).

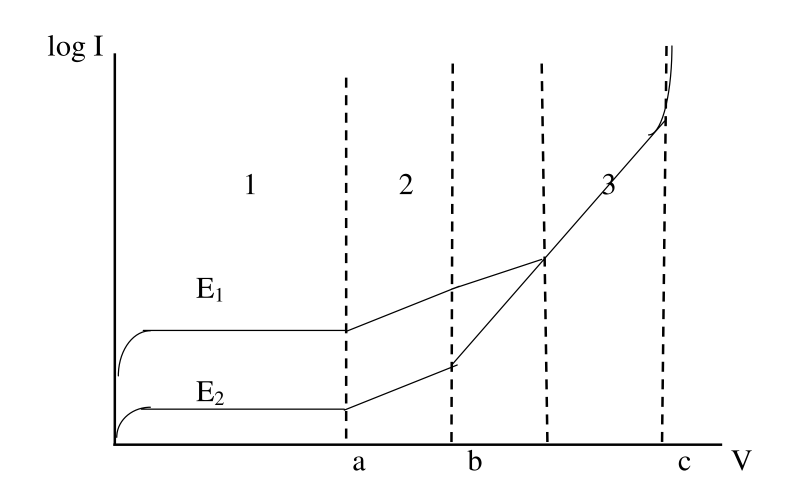
فإذا كان احتمال تكوين إلكترون كهروضوئي بواسطة الإلكترون الواحد هو γ وكان عدد الإلكترونات الثانوية الناتجة عن تصادم إلكترون واحد بالذرات n ، يكون $n\,\gamma$ عبارة عن عدد الإلكترونات الكهروضوئية الناتجة عن n إلكترون ثانوي. ثم يتضاعف هذا العدد بفعل التصادمات مكونا $n^2\,\gamma$ إلكترونا ثانويا. وهذا العدد الأخير يؤدي بدوره إلى تكوين $n^2\,\gamma^2$ إلكترون كهروضوئي. وبجمع جميع عناصر هذه المتوالية الهندسية وقسمته على عدد الإلكترونات الابتدائية يمكن إيجاد معامل التضاعف M للعداد التناسبي وهو:

$$M = n / (1 - n\,\gamma) \qquad (4\text{-}16)$$

ويبين معامل التضاعف M عدد مرات تضاعف الإلكترونات الابتدائية (أي الناتجة عن الجسيم النووي ذاته). فإذا كان مقدار $n\,\gamma << 1$ يصبح معامل تضاعف العداد مساويا $M = n$. ويكون هذا التضاعف ناتجا عن التأين الثانوي فقط، ولا تلعب الفوتونات دورا ملحوظا في التأين، وبالتالي يمكن إهمالها واعتبار مقدار γ مساويا للصفر. ويسمى العداد في هذه الحالة بالعداد التناسبي (proportional counter) نظرا لأن

العدد الكلي للإلكترونات الثانوية يتناسب مع عدد الإلكترونات الابتدائية الناتجة عن الجسيم النووي.

وهكذا، فإنه عند زيادة فرق الجهد بين القطبين فيما بعد عتبة التشبع (النقطة a على الشكل 4-9) لغرفة التأين يبدأ العداد في العمل كعداد تناسبي. ويبين شكل (4-9) منطقة الجهود التي يتحقق عندها تشغيل العداد في المنطقة التناسبية وهي المنطقة 2. وفي هذه المنطقة



شكل (4-9)
العلاقة بين الجهد والتيار في العدادات
1- منطقة غرفة التأين
2- منطقة العداد التناسبي
3- منطقة عداد غايغر- ميولر

يزداد التيار زيادة كبيرة (من 1 إلى 1000 مرة) حسب مقدار الجهد المطبق V . وعلى الرغم من زيادة التيار فإنه يستمر متناسبا مع عدد الأزواج الإلكترونية الأيونية الناتجة عن الجسيم النووي، وبالتالي متناسبا مع طاقة هذا الجسيم. فعند دخول جسيمين ذوي طاقتين مختلفتين بحيث تكون $E_2 < E_1$ (شكل 4-9) ينتج عنهما تياران مختلفان، وبالتالي جهدان

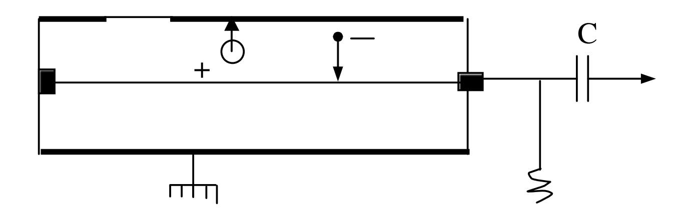
مختلفان، سواء في منطقة غرفة التأين أو في منطقة العداد التناسبي، مما يمكن من فصل هاتين الطاقتين. وفي نهاية منطقة العداد التناسبي يصبح من الصعب تمييز الطاقات المختلفة للجسيمات.

ويمكن من حيث المبدأ أن تكون العدادات التناسبية مستوية الأقطاب ولكنها تجهز على شكل اسطوانة (شكل4−10) حيث يقوم السلك المحوري الرفيع بدور المجمع (الأنود). لذلك، فهو يوصل بالقطب الموجب لمنبع الجهد العالي. أما جسم الأسطوانة فيوصل بالأرض (أي بالقطب السالب لمنبع الجهد العالي)، وتتجمع عليه الأيونات الموجبة. وفي حالة وجود نافذة يمكن أن تكون هذه النافذة على الجدار الأسطواني للعداد أو في قاعه. أما السعة C فالغرض منها منع وصول الجهد المستمر من منبع الجهد إلى جهاز القياس.

وبالنسبة للعداد الأسطواني يمكن إيجاد شدة المجال الكهربائي E في أية نقطة بداخله تبعد مسافة r من محور الأسطوانة، وذلك باستخدام العلاقة المعروفة التالية:

$$E = V / r \ \ln(b/a) \qquad (4\text{-}17)$$

حيث: V هي جهد المجمع (الأنود)، b هو نصف القطر الداخلي للأسطوانة، a هو نصف قطر السلك المحوري. فإذا كان جهد السلك 1000 فولت، $b = 1$سم، $a = 0.01$ سم تصل شدة المجال على مسافة 0.01سم من السلك إلى حوالي 6000 فولت/سم. لذلك، نجد أن التأين الثانوي يحدث أساسا بالقرب من سلك الأنود. أما إذا تكونت الإلكترونات الابتدائية بعيدا عن المجمع فإنها تتحرك أولا بفعل المجال في اتجاه المجمع ثم تبدأ مراحل التأين الثانوي عند اقترابها منه (في حدود 0.1سم من مركزه).



R_0
HV +

شكل (4–10): العداد التناسبي

4–5–1 شكل نبضات العداد التناسبي
Pulse shape of the proportional counter

تستخدم العدادات التناسبية، عموما، في النظام النبضي وليس في نظام التيار المستمر. وتنتج النبضة في العداد التناسبي عن المركبة الأيونية أساسا وليس عن المركبة الإلكترونية للتيار. ويرجع السبب في ذلك إلى تكون سحابة أيونية (ناتجة عن التأين) بالقرب من المجمع (الأنود). فعند وصول الإلكترونات السريعة إلى الأنود تكون الأيونات الموجبة ما زالت بالقرب منه فتعادل بذلك أثر الإلكترونات على جهد الأنود. ويمكن تحديد قيمة الجهد الناتج عن المركبة الإلكترونية للتيار وذلك باستخدام العلاقة النظرية التالية:

$$V' / V_\infty = l' / a \ln (b/a) \qquad (4\text{-}18)$$

حيث V' جهد النبضة الناتج عن المركبة الإلكترونية بعد مرور وقت كاف من بدئها، V_∞ هو الجهد الكلي للنبضة، l هو متوسط المسار الحر للإلكترونات. فعند استخدام عداد تناسبي بالأبعاد السابقة نفسها وعندما يكون الضغط داخل العداد مساويا 0.5 ضغط جوي تكون l في حدود $2.5\text{x}10^{-3}$سم. عندئذ تصبح:

$$V' / V_\infty = 0.05$$

أي أن الجهد الناتج عن المركبة الإلكترونية يشكل حوالي 5 % من الجهد الكلي للنبضة.

وحيث أن التأين الثانوي يحدث أساسا بالقرب من الأنود فإنه عندما يكون معامل التضاعف M كبيرا لا يعتمد جهد النبض على مكان مرور الجسيم النووي في العداد. ويمكن إيجاد كيفية تغير النبضة كدالة من الزمن طبقا للعلاقة النظرية التالية:

$$V^{+}(t) = [M\, N_0\, e / 2C_0 \ln(b/a)] \ln(1+ 2\, \mu^{+} V / p\, a^2 \ln(b/a) \qquad (4-19)$$

حيث N_0 عدد الأزواج الابتدائية الناتجة عـن الجسـيم النـووي نفسه، M معامل التضاعف للعـداد، e شـحنة الإلكتـرون، C_0 سـعته الداخلية، μ^{+} حركية الأيونات ، p الضغط داخل العداد. لذلك، يزداد جهد النبضة أولا بطريقة خطية مع الزمن، ثم يقل معدل الزيادة مع الـزمن بحيث تصبح العلاقة لوغاريتمية، إلى أن يصل الجهد إلى أقصى مقـدار له وهو:

$$V^{+}_{max}= M\, N_0\, e\ /C_0$$

عند زمن t مقداره:

$$t\ =\ (b^2 - a^2)\, P \ln (b/a) /\ \ 2\, \mu^{+} V \qquad (4-20)$$

ويبين الشكل (4−11) كيفية تغير نبضة جهد الخرج كدالة مـن الزمن لعداد تناسبي بالأبعاد المذكورة سلفا. عند ضـغط مقـداره 0.05 ضغط جوي وجهد أنودي $V = 1500$ فولت. ويلاحظ أن معـدل نمـو جهد النبضة يكون سريعا في البداية، ثم يقل هذا المعدل وتزداد النبضـة ببطئ إلى أن يصل جهدها إلى أقصى قيمة له. ويمكن أن تستمر النبضة عند هذه القيمة لفترة طويلة (ربما تصل إلى حـوالي 1 ميللـي ثانيـة) وخلال هذا الزمن يكون العداد غير مستعد لاستقبال أي جسيم آخـر أو تسجيله.

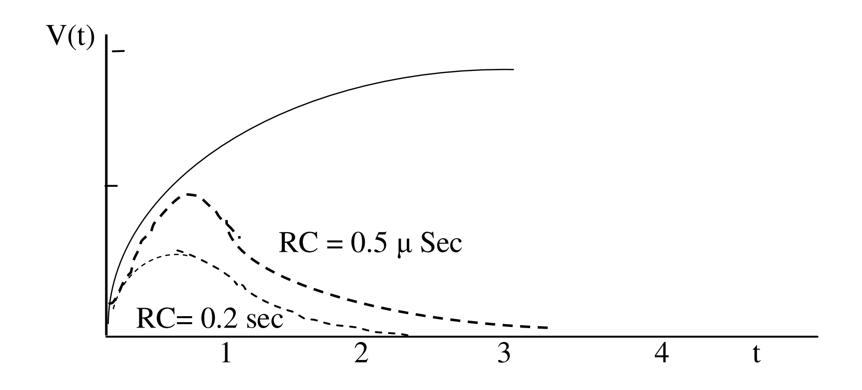
ويمكن خفض زمن استمرار النبضة بشكل ملحوظ وذلك بتشكيل النبضة باستخدام دارات التشكيل المختلفة. وتستخدم عادة لهذا الغـرض الدارة التفاضلية (differentiation circuit) التي تتكون من مقاومة ومكثف عند مخرج العداد أو في مدخل المكبر. وتبين المنحنيات المتقطعة علـى الشكل(4−11) كيفية تشكيل النبضة باستخدام دارات تفاضـلية بثابـت زمني (RC) مختلف. ويلاحظ أنه كلما انخفض ثابـت الـزمن للـدارة التفاضلية قل زمن استمرار النبضة وانخفض جهدها في الوقت نفسه.

وتجدر الإشارة إن جهد النبضات الناتجة عن الجسـيمات نفسـها والطاقات نفسها في العداد التناسبي تتراوح ضمن حـدود معينـة ΔV. ويؤدي هذا بدوره إلى تفاوت في تحديد طاقات الجسيمات مقـداره ΔE .

ويرجع السبب في ذلك لما سبق ذكره بالنسبة لغرفة التأين وكذلك لعـــدة أسباب أخرى أهمها ما يلي:

أ- حدوث اختلاف في عدد الإلكترونات الثانوية لخضوعها لقوانين الاحتمالات.
ب- عدم تجانس سلك المجمع حيث يمكن أن يختلف نصـــف قطره اختلافا طفيفا من مكان لآخر.
ج- اختلاف المجال في منتصف العداد وعند أطرافــه (فـــي حالة عدم وجود حلقات حارسة).

لذلك، فإن القدرة التحليلية للطاقات للعداد التناسبي تكون أسوأ من مثيلتها بالنسبة لغرفة التأين. ويبلغ مقدار القدرة التحليلية للطاقة للعدادات التناسبية حوالي 10 – 30 %.



شكل (4-11)
تشكيل النبضة باستخدام دارات تفاضلية بثابت زمني (RC) مختلف

زمن التأخير The delay time

يجب التنويه بحدوث تأخير زمني بين لحظة دخول الجسيم للعداد وخروج نبضة الجهد على المخرج. وهذا التأخير ناتج من زمن مـــرور الإلكترونات الأولية من مكان تكونها داخل العداد إلى أن تقتـــرب مـــن

المجمع. وبالتالي، يعتمد زمن التأخير (delay time) على مكان مرور الجسيم النووي ويمكن حساب أكبر مقدار له من نصف القطر الداخلي للاسطوانة والسرعة الانسياقية للإلكترونات كالتالي:

$$t_d = b / \bar{v}$$

ومن أهم عيوب العدادات التناسبية اعتماد معامل التضاعف M على الجهد مما يؤدي إلى اختلاف جهد النبضة الخارجة عند حدوث تغير طفيف في جهد المنبع. لذلك، فإنه يجب استخدام منبع جهد عال ذي استقرارية عالية (highly stabilized).

6-4 عدادات غايغر – ميولر Geiger – Muller counters

عند زيادة الجهد بين قطبي العداد التناسبي إلى ما بعد منطقة التناسب (فيما بعد النقطة b شكل 4-9) يزداد معامل التضاعف M زيادة هائلة وبالتالي يزداد التيار زيادة طارئة (شكل 4-9). ويرجع السبب في ذلك إلى زيادة احتمال انطلاق الفوتونات فوق البنفسجية عند تصادم الإلكترونات بجزيئات الغاز وتكوين إلكترونات كهروضوئية (أي زيادة قيمة الاحتمال γ). وعند هذه الجهود العالية تصبح هذه الفوتونات هي المسؤول الأساسي عن الإلكترونات الثانوية. وينتشر التأين الثانوي في جميع أنحاء العداد، وبالتالي يصل العداد إلى حالة التفريغ الكهربائي، وينتج عن ذلك تيار كبير للغاية دون النظر لعدد الإلكترونات الأولية. ويعرف العداد عند هذه الجهود باسم عداد غايغر – ميولر (وهما مكتشفاه).

وبالرجوع إلى العلاقة (4-16) يلاحظ أن هذا الأمر يتحقق عندما تصبح قيمة $n\gamma = 1$. عندئذ يصبح معامل التضاعف M عبارة عن ما لانهاية، أي أن:

$$M = n / (1-1) = \infty$$

وفي هذه الحالة فإن جهد النبضة لم يعد يتوقف على عدد الإلكترونات الأولية الناتجة عن الجسيم النووي. إذ أنه يكفي تكون زوج إلكتروني – أيوني لبدء عملية التفريغ وظهور جهد النبضة. وبالتالي

يلاحظ أن جهد النبضة لم يعد يتوقف على طاقة الجسيم النووي المسبب لها. لذلك، لا يستخدم عداد غايغر– ميولر لتحديد طاقة الجسيمات النووية، وإنما فقط لتسجيل عدد هذه الجسيمات دون النظر لطاقاتها.

وبمجرد بدء التأين والتفريغ الكهربي لا يتوقف مرور التيار داخل العداد ذاتيا وإنما يستمر حتى في حالة عدم وصول جسيمات نووية جديدة. لذلك، فإنه يجب إيقاف عملية التفريغ داخل العداد ليكون جاهزا لاستقبال جسيم جديد وتسجيله. ويوجد نوعان من عدادات غايغر – ميولر يختلفان باختلاف طريقة إيقاف التفريغ وهما عدادات ذات إطفاء خارجي والأخر ذات إطفاء ذاتي.

4–6–1 عدادات غايغر ذات الإطفاء الخارجي

Non – self quenching G.M counters

عندما يملأ العداد بغاز خامل (مثل الأرجون) تؤدي الفوتونات فوق البنفسجية إلى انطلاق الإلكترونات الكهروضوئية من المصعد (الكاثود الذي تمثله الاسطوانة الخارجية) وليس من ذرات الأرجون. وتتحرك جميع الإلكترونات في اتجاه المجمع (شكل 4–10) الذي تتكون حوله سحابة أيونية كثيفة تتحرك بدورها في اتجاه المهبط. وعند تحرك هذه السحابة إلى المهبط يبدأ التيار في المرور ويؤدي إلى ظهور نبضة الجهد على المقاومة R_0 ، وعند وصول هذه السحابة الأيونية إلى المهبط تنتج فوتونات فوق بنفسجية جديدة وإلكترونات ثانوية فيستمر التيار في المرور ولا يتوقف. وهكذا، يستمر مرور التيار طالما بقي الجهد V عاليا ولم يتم تخفيضه بأي وسيلة خارجية. ولتخفيض مقدار الجهد يمكن اختيار قيمة R_0 كبيرة للغاية (في حدود $10^{8} - 10^{9}$ أوم). فعند تحرك السحابة الأيونية بعيدا عن المجمع ينخفض جهده بما يعادل الجهد المستهلك على المقاومة $I \; R_0$. أي أن مقدار جهد المجمع (الأنود) عند تحرك السحابة الأيونية يصبح $V_a = V - IR_0$ ،حيث I تيار السحابة الأيونية. فإذا كانت قيمة R_0 كبيرة ينخفض جهد المجمع، بحيث يصبح أقل من الجهد اللازم لاستمرار التفريغ (أقل من V_b شكل 4–9). لذلك فإنه عند وصول السحابة الأيونية للمهبط يكون الجهد أقل من الحد اللازم لاستمرار التفريغ وبالتالي يطفأ العداد. فإذا كان زمن انتقال الأيونات

داخل العداد 200 ميكروثانية وسعه الداخلية في حدود 10 بيكوفارد يجب أن تكون قيمة R_0 في حدود $4x10^{8}$ أوم. وبعد أن يطفأ العداد يكون جهد المجمع أقل من الجهد اللازم لتشغيله في منطقة غايغر، فيبدأ هذا الجهد في الزيادة من جديد إلى أن يصل إلى القيمة الأصلية V بعد زمن كبير بالمقارنة بثابت الزمن $R_0 \ C_0$ (بعد حوالي 10^{-3} ثانية). وخلال هذا الوقت الذي يستعيد فيه العداد جهده على المجمع يكون العداد غير مستعد لاستقبال جسيمات جديدة. ولو دخل جسيم إلى العداد خلال هذا الزمن فإنه يمكن أن يسجل ولكن تكون النبضة الناتجة ضعيفة للغاية بحيث لا يحس بها الجهاز الإلكتروني التالي. وتعرف هذه الفترة الزمنية باسم فترة الاسترجاع (recovery time). ويلاحظ أن أهم عيوب هذا النوع من العدادات هو كبر فترة الاسترجاع (حوالي 10^{-3} ثانية).

4-6-2 عدادات غايغر ذات الإطفاء الذاتي

Self – quenching G.M counters

يتميز هذا النوع من العدادات بعدم وجود مقاومة كبيرة لخفض جهد المجمع (الأنود) وإنما تستخدم مقاومة صغيرة. بذلك، يبقى الجهد ثابتا على الأنود ولا ينخفض إلى ما دون حد جهد غايغر. ولإحداث الإطفاء في هذا النوع من العدادات يملأ العداد بخليط من غاز الأرجون (حوالي 90%) وبخار مركب متعدد الذرات مثل الكحول أو الأسيتون (حوالي 10%). وعند دخول الجسيم النووي يحدث التأين الابتدائي ثم تتبعه مجموعة التأينات الثانوية بالقرب من الأنود وتنطلق الفوتونات فوق البنفسجية التي تؤدي إلى انطلاق الإلكترونات الكهروضوئية بالأسلوب نفسه المتبع في عدادات غايغر السابقة. ولكن يحدث اختلاف في هذه العدادات، يرجع أساسا إلى قابلية بخار الكحول أو الأسيتون العالية لامتصاص الفوتونات فوق البنفسجية. بذلك، تمتص هذه الفوتونات في الغاز ولا تصل إلى المهبط. وبذلك تكون الإلكترونات الكهروضوئية صادر من جزيئات بخار الكحول وليس من ذرات الأرجون أو ذرات مادة المهبط (الكاثود) الفلزية. ونظرا للقابلية العالية لامتصاص الفوتونات في جزيئات الكحول وتأينها فإن هذه الفوتونات لا تبتعد كثيرا عن الأنود وينحصر التفريغ الكهربي بالقرب منه. وهكذا،

تتحرك السحابة الأيونية في اتجاه المهبط مكونة بذلك النبضة الكهربائية التي لا تتأثر بالمركبة الإلكترونية. وتتكون الأيونات الموجبة التي تصل إلى المهبط كليا من أيونـــات جزيئـــات الكحـــول أو الأســـيتون وذلـــك لامتصاص الفوتونات بواسطة هذه الجزيئات، وكذلك لأنه عند تحـــرك أيون أرجون موجب في اتجاه المهبط فإنـــه يكتســـب إلكترونـــا عنـــد اصطدامه بجزيء الكحول المتعادل الذي بدوره يتحول إلى أيون موجب (لأن طاقة ارتباط الإلكترون بذرة الأرجون أعلى من طاقـــة ارتبـــاط الإلكترون بجزيء الكحول). وعند وصول أيونات الكحول الموجبة إلى المهبط فإنها لا تؤدي إلى انبعاث إلكترونات ثانوية من مـــادة المهـــبط، وبالتالي يحدث الإطفاء ذاتيا. وهكذا، يمكن تلخيص دور جزيئات الغـــاز المتعددة الذرات مثل بخار الكحول أو الأسيتون في الآتي:

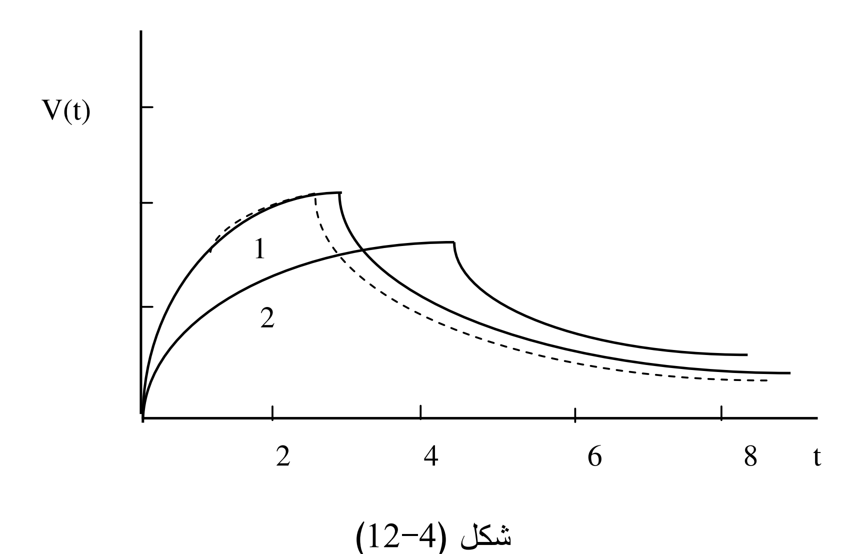
1- منع وصول الفوتونات إلى المهبط، وبالتالي منـــع انطلاق الإلكترونات الكهروضوئية منه.
2- منع وصول أيونـــات الأرجـــون الموجبـــة إلـــى المهبط، وبالتالي منع انبعاث الإلكترونات الثانوية منه.

4-6-3 شكل النبضة والزمن الميت وزمن الاسترجاع

تتكون نبضة التيار الناتجة على مخرج عداد غايغر ذي الإطفاء الذاتي من المركبة الأيونية فقط. وتتحرك السحابة الأيونية فـــي اتجـــاه المهبط مكونة شكلا أسطوانيا رفيعا في أية لحظة. ويستعرض شكل (4-12) الشكل التجريبي للنبضة من العداد ذي الإطفـــاء الـــذاتي (الخـــط المتصل 1)، وكذلك الشكل النظري الناتج عن المركبة الأيونية. ويعتمد زمن امتداد النبضة على الأبعاد الهندسية للعداد. كما يعتمد شكلها علـــى مكان حدوث التأين الابتدائي بالنسبة للمصعد (للأنود). فكلما بعد أثـــر الجسيم النووي عن المصعد زاد الامتداد الزمني للنبضة وقلـــت القيمـــة القصوى للتيار الناتج عنها (الخط المتصل 2).

الزمن الميت The dead time

أثناء عملية التضاعف الإلكتروني وانتقال السحابة الأيونيـــة مـــن حول المصعد (الأنود) إلى المهبط (الكاثود) يكون العداد غيـــر حســـاس لاستقبال جسيم نووي جديد، نظرا لانخفاض شدة المجال الكهربائي بين القطبين في هذا الوقت. وبمجرد وصول السحابة الأيونية للمهـــبط فإنـــه يسترجع جهده بسرعة وتعود شدة المجال بـــين القطبـــين إلـــى قيمتهـــا الأصلية. ويعرف الزمن بين لحظة دخول الجسيم النووي ووصول الجهد على المصعد إلى عتبة غايغر (النقطة b شكل 4-9) بـــالزمن الميـــت للعداد (The dead time). وخلال هذا الزمن يكون العداد غيـــر حســـاس لتسجيل أي جسيم آخر.



شكل (4-12)

(1) الشكل التجريبي للنبضة من العداد ذي الإطفاء الذاتي.

(2) شكل النبضة عند ابتعاد أثر الجسيم النووي عن المصعد

زمن الاسترجاع The recovery time

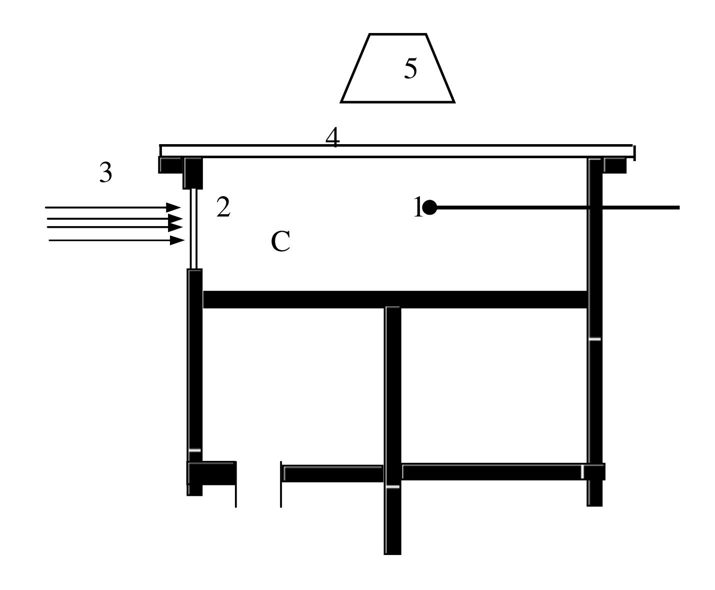
تعرف الفترة الزمنية بين وصول الجهـــد إلـــى عتبـــة غـــايغر ووصوله إلى القيمة القصوى بـــزمن الاســـترجاع (the recovery time). وتعتبر هذه الفترة صغيرة بالنسبة للعدادات ذات الإطفاء الذاتي (حـــوالي

5×10^{-6}) ثانية، وذلك بسبب صغر قيمة المقاومة R_0. وخلال زمن الاسترجاع يستطيع العداد تسجيل الجسيم النووي ولكن يكون تيار (أو جهد) النبضة أقل.

وعموما، تختلف عدادات غايغر باختلاف الغرض المخصصة له. فتوجد منها أنواع ذات نوافذ وأخرى بدونها، وذلك تبعا لنوع الجسيمات أو الإشعاعات المطلوب الكشف عنها. وهناك أنواع يستخدم فيها غاز ثالث فلوريد البور BF_3 أو يعمل فيها نافذة من مادة البور وذلك لاستخدامها للكشف عن النيوترونات.

4–7 الغرفة السحابية The cloud chamber

تعتبر الغرفة السحابية من أقدم الوسائل المستخدمة للكشف عن الجسيمات المشحونة بالرؤية المباشرة حيث استخدمها ويلسون لأول مرة عام 1912م. ويبين شكل (4–13) رسما توضيحيا للغرفة السحابية، حيث يملأ الفراغ الداخلي للغرفة بالهواء النقي تماما من الغبار والمشبع ببخار الماء عند درجة حرارة الغرفة. وعند تحرك المكبس فجأة وبسرعة عالية إلى أسفل يحدث تمدد مفاجئ لخليط الهواء وبخار الماء مما يؤدي إلى الانخفاض المفاجئ في درجة حرارة الخليط ويصبح بخار



7

6

شكل (4–13): الغرفة السحابية

1–	مصدر مشع	2–	نافذة لدخول الضوء
3–	الضوء	4–	غطاء شفاف
5–	آلة تصوير	6–	المكبس
7–	فتحة خروج الهواء		

الماء في حالة ما فوق التشبع. فإذا مرت في هذه اللحظة جسيمات مشحونة وأدت إلى تكوين أزواج إلكترونية–أيونية داخل الفراغ C يتكثف بخار الماء فوق المتشبع على الأيونات، ويظهر أثر لقطرات الماء المتكثفة على الأيونات بطول أثر الجسيمات المشحونة. ويمكن رؤية هذه القطرات، وبالتالي أثر الجسيم إما بالعين المجردة أو بالتصوير في هذه اللحظة، وذلك بإدخال ضوء من فتحة جانبية والتصوير خلال الغطاء الشفاف العلوي للغرفة. وبعد التصوير يعاد المكبس إلى وضعه الأصلي، ويتم توصيل جهد بالغرفة لسحب الأيونات من داخلها فتصبح الغرفة بذلك مستعدة لدورة قياسات أخرى. وعموما، يتم تجهيز الغرفة بأدوات لسحب المكبس والتصوير وإعادة المكبس، بحيث تتم الدورة بأكملها وتصبح الغرفة جاهزة آليا.

وتعريف نسبة فوق التشبع S هو:

$$S = P_f / P_I \qquad (4\text{-}21)$$

حيث P_f ، P_i هو الضغط بعد وقبل التمدد على الترتيب. كذلك فإن نسبة التمدد E هي:

$$E = \tau_f / \tau_i \qquad (4\text{-}22)$$

حيث τ_f ، τ_i هما حجم الغرفة بعد وقبل التمدد على الترتيب. وبالنسبة لخليط الهواء وبخار الماء يحدث التكثف على الأيونات السالبة فقط إذا

كانت قيمة E محصورة بين 1.25 ، 1.31 . ولكن يحدث التكثف على كل من الأيونات السالبة والموجبة إذا كانت قيمة E محصورة بين 1.31 ، 1.38 . أما إذا زادت E على 1.38 فيحدث التكثف في الفراغ كله دون النظر لوجود أيونات وتتكون سحابة داخل التجويف بأكمله. لذلك، فإنه يفضل أن تكون قيمة E في حدود 1.35 بالنسبة لخليط الهواء وبخار الماء. أما بالنسبة لخليط الأرجون والكحول فإنه يمكن الحصول على أفضل صورة عندما تكون E = 1.10 حيث يحدث التكثف على كل من الأيونات الموجبة والسالبة.

ويمكن استخدام الغرفة السحابية في تحديد شحنة الجسيم وزخمه وبالتالي طاقته. فإذا تعرض الفراغ الداخلي للغرفة بعد التمدد مباشرة لمجال مغناطيسي كثافة تدفقه B ينحرف مسار الجسيمات المشحونة تحت تأثير هذا المجال، ويصبح المسار عبارة عن جزء من محيط دائرة نصف قطرها R . وتحكم هذا المسار العلاقة المعروفة التالية الخاصة بحركة الجسيمات المشحونة في المجال المغناطيسي .

$$m v = q BR \qquad (4\text{-}23)$$

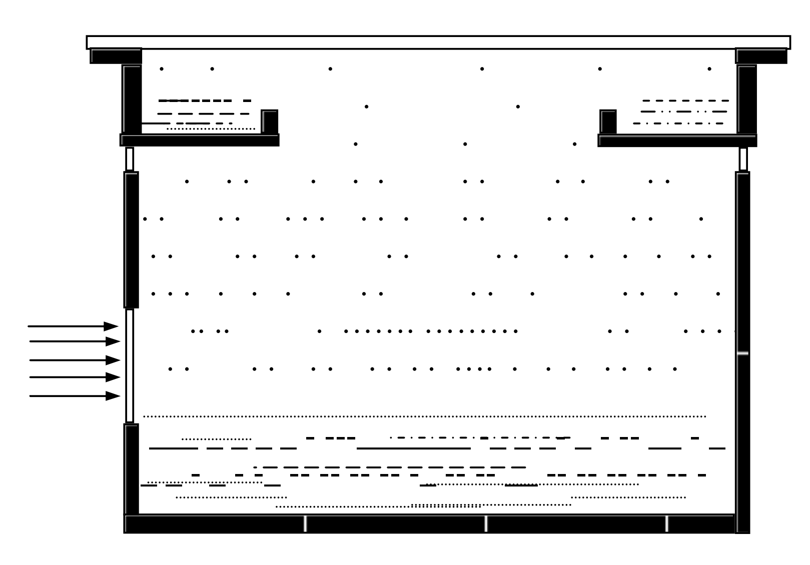
حيث m هي كتلة الجسيم النووي ، v هي سرعته و q شحنته. ويحدد اتجاه الانحراف نوع الشحنة (موجبة أو سالبة). كذلك، فإنه يمكن تحديد طاقة الجسيم من طول الأثر.

ومن أهم عيوب الغرف السحابية هو قصر الزمن الحساس (حوالي نصف ثانية). والزمن الحساس عبارة عن زمن استمرار القطرات المكثفة، حيث أن هذه القطرات تتبخر من جديد بسبب وصول الحرارة إليها من خارج الغرفة.

4–8 غرف الانتشار The diffusion chamber

نظرا لصغر الزمن الحساس للغرفة السحابية فقد تم تطوير غرفة جديدة سنة 1936 م، تعرف بغرفة الانتشار (شكل 4–14). وتتكون الغرفة من إناءين أحدهما علوي والأخر سفلي. ويملأ الإناء العلوي بسائل مثل الكحول الميثيلي (methyl alcohol) ، نظرا لأن بخاره قابل

للتكثف. وتكون درجة حرارة هذا الإناء هي درجة حرارة الغرفة. أما الإناء السفلي فيجب تبريده إلى حوالي(− 60) ° م ، وذلك باستخدام خليط من الكحول الميثيلي وثاني أكسيد الكربون المتصلب (أي في حالة صلبة)، فيؤدي ذلك إلى تدرج درجة الحرارة بين الإناء السفلي والعلوي. وعند تبخر السائل الموجود بالإناء العلوي ينتشر هذا البخار إلى أسفل بسبب انخفاض درجة الحرارة عند القاع. لذلك يكون البخار في حالة ما فوق التشبع في المنطقة السفلي من الغرفة. وعند مرور جسيم مشحون في هذه المنطقة وتكوين الأيونات يتكثف بخار عليها مكونا قطرات السائل، وبالتالي يمكن تصوير أثر الجسيم. ولإعداد الغرفة لدورة قياسات جديدة يجب سحب الأيونات من داخلها باستخدام مجال كهربائي. وتتميز هذه الغرفة عن سابقتها بكبر الوقت الحساس (حوالي 10 ثوان).



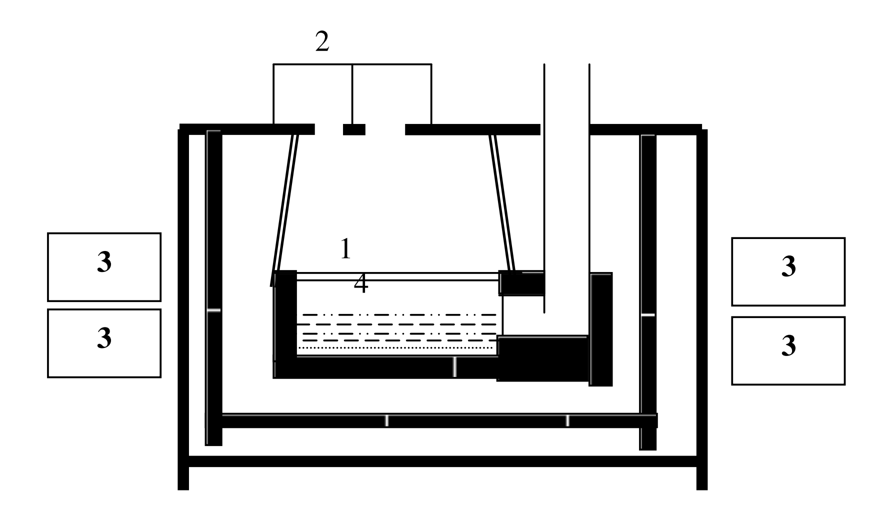
شكل (4−14)
غرفة الانتشار

وتستخدم هذه الغرف، عموما، لتسجيل الجسيمات النووية المشحونة ذات الطاقات العالية. لذلك، يجب أن يكون ضغط الغاز

بداخلها كبيرا جدا، حيث يصل إلى حوالي 20 ضغطا جويا حتى تتوقف هذه الجسيمات ذات الطاقة العالية بداخلها.

4-9 الغرفة الفقاعية The bubble chamber

تم تصميم أول غرفة فقاعية عام 1952. ويقوم عمل هذه الغرفة على استخدام ظاهرة تكوين الفقاعات عند تسخين السوائل تسخينا فائقـا ويبين شكل (4 –15) رسما تخطيطيا لغرفة فقاعيـة. وتمـلأ الغرفـة، عموما، بسائل هيدروجين (أو هليوم أو زينون) عند درجـة حـرارة تتراوح بين –246° م للهيدروجين، –20°م لسائل الزينون. ويتم تسخين السائل إلى درجة حرارة أعلى من نقطة غليانه، ولكن يبقى السائل فـي الطور السائل (ولا يتحول إلى بخار)، عـن طريـق اسـتخدام ضـغط خارجي عال جدا (عدة عشرات من الضغط الجوي حسب نوع السائل). وعند خفض الضغط فجأة فإن السائل الفائق التسخين لا يبدأ في الغليـان في الحال وإنما تمر فترة معينة دون حدوث الغليان. وعند مرور جسـيم مشحون خلال هذه الفترة في الغرفة فإنه يؤدي إلى تأيين السائل، وتنمو فقاعات على هذه الأيونات في خلال زمن مقداره حوالي 10^{-2} ثانية.



شكل (4-15)
الغرفة الفقاعية

1- لوح شفاف 2- آلة تصوير
3- ملفات مغناطيسية 4- هيدروجين سائل

وهكذا، تتكون فقاعات على طول مسار الجسيم المشحون ويــتم تصوير هذه الفقاعات وسحب الأيونات بواسطة مجال كهربائي وزيــادة الضغط من جديد قبل بدء غليان السائل. وتصبح الغرفة جاهزة لتســجيل جسيمات أخرى بعد عدة ثواني قليلة. والزمن الحساس لهذه الغرفة هــو عبارة عن الفترة من لحظة خفض الضغط الخارجي على الغرفــة إلـــى لحظة بدء غليان السائل (ويجب ألا يحدث الغليان وذلك بزيادة الضــغط إلى قيمته الأولية). ولزيادة الزمن الحساس يجب أن يكون جدار الغرفــة الداخلي ناعما تماما وأن يكون السائل نقيا للغاية وإلا انخفــض الــزمن الحساس إلى حوالي 10^{-3} ثانية.

وتتميز هذه الغرفة عن سابقتها بالآتي:

أ- استخدام سوائل ذات كثافة عالية بدلا من الغازات، وبالتــالي يمكــن اســتخدامها لتسجيل الجسيمات النووية ذات الطاقــات العالية (عدة آلاف ميغا إلكترون فولت).
ب- قصر زمن إعدادها لدورة القياسات التالية (عدة ثوان).
ج- إمكانية استخدام أبعاد كبيرة للسائل بحيث يقع مدى الجسيم النووي بالكامــل داخــل السائل.

لذا فإنه يفضل استخدام غرفة الفقاعات عند إجــراء الدراســات النووية في مجال الطاقات العالية.

4-10 الكواشف الوميضية The scintillation detectors

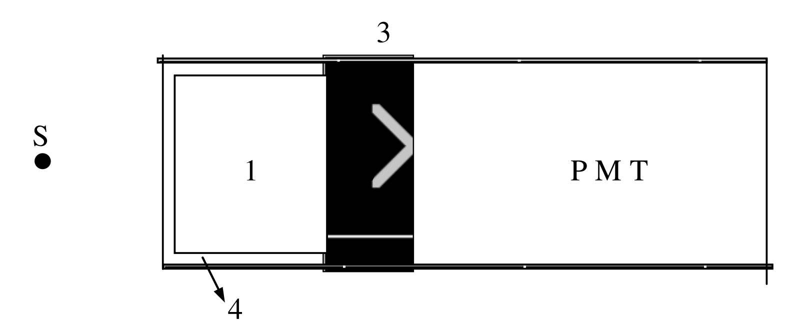
4-10-1 مكونات الكاشف الوميضي

عند سقوط الجسيمات المشحونة أو الإشعاعات السينية أو إشعاعات جاما على مواد معينة مثل يوديد الصوديوم NaI أو يوديد السيزيوم CsI أو الأنثراسين، أو الاستلبين أو غيرها، ينتج عن ذلك وميض ضوئي. وتعرف هذه المواد باسم المواد الوميضية (scintillators) ولقد استخدمت هذه الظاهرة للكشف عن الإشعاعات المؤينة بجميع أنواعها ولتحديد طاقاتها.

ويتكون الكاشف الوميضي (شكل4–16) من عدة أجزاء أساسية هي: المادة الوميضية وأنبوب توصيل الضوء (light pipe) والعاكس الضوئي (light reflector)، وأنبوب التضاعف الفوتوني (photomultiplier tube) . فعند سقوط الإشعاعات أو الجسيمات النووية على المادة تصدر هذه المادة ومضة ضوئية. وتنتقل الومضة الضوئية عبر أنبوب توصيل الضوء إلى المهبط (الكاثود) الضوئي (potocathode) لأنبوب التضاعف الفوتوني.

أما دور العاكس الضوئي فهو يقوم بعكس الضوء الواقع عليه وإعادته إلى المهبط الضوئي للأنبوب حتى لا يضيع جزء من الضوء الناتج عن الجسيم. وعند سقوط الضوء على المهبط الضوئي تنطلق منه إلكترونات تبعا لظاهرة الانبعاث الكهروضوئي، ثم يتضاعف عدد الإلكترونات تضاعفا فائقا داخل أنبوب التضاعف الفوتوني. وتصل الإلكترونات في النهاية إلى مجمع (أنود) أنبوب التضاعف منتجة بذلك نبضة كهربية على مخرج الأنبوب. وهكذا، يمكن تلخيص عملية الكشف باستخدام الكواشف الوميضية في ستة مراحل مرتبة كالآتي:

1- امتصاص طاقة الجسيم النووي داخل المادة الوميضية مما يؤدي إلى إثارة أو تأين هذه المادة.
2- تحول الطاقة الممتصة في المادة إلى ضوء خلال العملية الوميضية.
3- انتقال الفوتونات الضوئية إلى المهبط الضوئي لأنبوب التضاعف.



شكل (4–16): الكاشف الوميضي

1–	المادة الوميضية	2–	أنبوب توصيل الضوء
3–	الغلاف الخارجي	4–	العاكس الضوئي
PMT –	أنبوب التضاعف	S –	المصدر المشع

4– امتصاص المهبط لطاقة الفوتونات الضوئية وانبعاث إلكترونات منه.

5– تضاعف عدد الإلكترونات داخل أنبوب التضاعف الفوتوني.

6– تجميع هذه الإلكترونات عند مصعد الأنبوب وتكوّن شحنة كهربائية كبيرة.

وترتبط الشحنة الكهربية Q المتجمعة على أنود الأنبوب بطاقة الجسيم الساقط E بالعلاقة التالية:

$$Q = eMn_{ph} = e\,MC\,T\,F\,S\,E \qquad (4\text{-}24)$$

حيث e شحنة الإلكترون، M معامل التضاعف في الأنبوب، n_{ph} عدد الإلكترونات الصادر من المهبط الضوئي، C هي كفاءة المادة الوميضية (أي نسبة الفوتونات الضوئية التي تخرج منها إلى الفوتونات المتكونة)، F هي شفافية أنبوب التوصيل، S حساسية المهبط الضوئي (أي عدد الإلكترونات الصادرة منه لكل إلكترون فولت من طاقة الفوتونات الساقطة). وتعتبر جميع المعاملات ثابتة للكاشف الواحد عند الجهد

الواحد. لذلك، يتضح أن الشحنة الكهربية المتكونة على مخرج أنبـــوب التضاعف تتناسب طرديا مع طاقة الجسيم الساقط.

4-10-2 أنواع المواد الوميضية **Types of scintillators**

يستخدم في الوقت الحالي عدد كبير مـــن المـــواد الوميضـــية. وتختلف خصائص هذه المواد اختلافا كبيرا. ويبين جدول (4-1) بعض أسماء المواد الوميضية شائعة الاستخدام وخصائصها.

ويجب أن تتوفر في المادة الوميضية الجيدة الخصائص التالية:

1- كفاءة عالية في تحويـــل طاقـــة الجســـيم النووي إلى طاقة ضوئية.
2- شفافية تامة للمادة بالنسبة للإشعاعات الصادرة منها.
3- صغر زمن التفكك.

جدول (4-1): خصائص بعض المواد الوميضية

اسم المادة الوميضية	كثافتها (غم/سم^3)	طول موجة الضوء المنبعث (انجستروم)	زمن التفكك بالثانية τ
بللورة الأنثراسين (مادة عضوية)	1.25	4400	$^{8-}$10x2.7
بللورة الاستيلبين(مادة عضوية)	1.15	4100	$^{9-}$10x5-3
يوديد صوديوم مزود بالتاليوم NaI(TI)	3.67	4100	$^{7-}$10x2.5
كبريتيد خارصين مزود بالفضةZn S(Ag)	4.10	4500	$^{5-}$10

وبمجرد دخول الإشعاعات النووية إلى المادة الوميضـــية تثـــار المادة وتبدأ في إصدار الفوتونات الضوئية. ويتغير عدد الفوتونات كدالة من الزمن طبقا للعلاقة التالية:

$$n = n_0 (1- e^{-t})$$

حيث: n عدد الفوتونات الصادرة بعد زمن مقداره t من لحظة دخول الإشعاعات النووية، n_0 العدد الكلي للفوتونات الصادرة. أما τ فهو عبارة عن الزمن اللازم لإصدار $(1-e^{-1})$ من الفوتونات أي 63 % منها. ويعرف هذا الزمن باسم زمن التفكك.

أما الخصائص الأخرى للمادة الوميضية كالكثافة والشكل والحجم وحالة المادة فتختلف باختلاف الغرض من الكاشف والجسيمات النووية وطاقاتها.

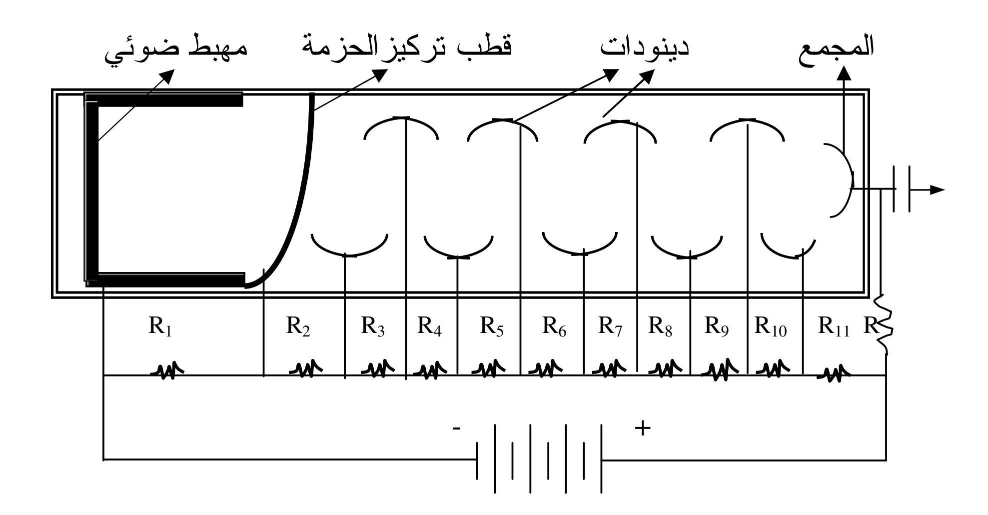
وتوضع المادة الوميضية عادة داخل حافظة محكمة القفل، وذلك لحمايتها من الصدمات ومنع وصول الضوء إليها ومنعها من التميع بواسطة الرطوبة الجوية. وتغطى المادة الوميضية (من جميع الجوانب عدا الجانب المتصل بالأنبوب الضوئي) بطبقة رقيقة من أكسيد المغنيسيوم (MgO) تعمل كعاكس للضوء. أما الجانب المتصل بالأنبوب الضوئي فيغطى بطبقة متجانسة السمك من الزجاج النقي، وذلك لوصول الضوء إلى المهبط الضوئي. وعند استخدام المادة الوميضية للكشف عن الجسيمات المشحونة الثقيلة أو جسيمات بيتا يجب عمل نافذة في الحافظة من ورقة رقيقة من الألمونيوم، وذلك لمنع وصول الضوء من الخارج، وفي الوقت نفسه للسماح بمرور هذه الجسيمات.

3-10-4 أنبوب التضاعف الفوتوني

The photomultiplier tubs (PMT)

أنبوب التضاعف الفوتوني عبارة عن أنبوب زجاجي مفرغ من الهواء تفريغا جيدا ويحتوي على أربعة عناصر رئيسة هي المهبط (الكاثود) الضوئي، وقطب تركيز الحزمة الإلكترونية، ومجوعة أقطاب تعرف بالدينودات (dynodes) ، والقطب المجمع (الأنود). ويبين شكل (4-17) رسما تخطيطيا لأنبوب التضاعف الفوتوني. ويقوم المهبط بإصدار إلكترونات عندما يسقط الضوء المنبعث من المادة الوميضية (ظاهرة الانبعاث الكهروضوئي). لذلك، يصنع المهبط من مادة شبه شفافة مغطاة من الداخل بطبقة رقيقة من مادة كهروضوئية. وعند انطلاق الإلكترونات من المهبط يتم توجيهها وتركيزها بواسطة قطب

تركيز الحزمة الإلكترونية الذي يعمل كعدسة مجمعـــة بحيـــث تصـــل الإلكترونات الخارجة من المهبط إلى الدينود الأول. وتقـــوم الـــدينودات بمضاعفة عدد الإلكترونات. فعند سقوط إلكترون بطاقة كبيـــرة (عـــدة عشرات إلكترون فولت) فإن ذلك يؤدي إلى انبعاث ثانوي من الـــدينود. وبذلك، يتضاعف عدد الإلكترونات على الدينود الأول ويتجه هذا العـــدد المتضاعف إلى الدينود الثاني. فإذا كانت طاقة الإلكترونات عند وصولها للدينود الثاني كبيرة يحدث الانبعاث الثانوي عليه ويتضاعف عددها من جديد. وهكذا، تستمر عملية التضاعف على كل دينود. وفي النهاية يـــتم تجميع هذا العدد الهائل من الإلكترونات بعد التضاعف علـــى المجمـــع (الأنود) فتظهر عليه نبضة كهربية ســـالبة (لأن شـــحنة الإلكترونـــات سالبة). ولكي تتحرك الإلكترونات الصادرة من المهبط الضـــوئي إلـــى الدينود الأول، فالثاني، فالثالث، ....، فالمجمع فإنه يجب أن يتزايد الجهد الموجب لهذه الأقطاب بالتتابع. ويتم تحقيق ذلك باستخدام منبع جهد عال V ومقسم للجهد مكون من عدة مقاومات (من R_1 إلى R_{11}على الشـــكل) بحيث يكون جهد المجمع مساويا لقيمة V ثم يتناقص الجهد بالتدريج إلى أن يصبح مساويا للصفر على المهبط. (تجدر الإشارة إلى أنه يمـــكن



شكل (4–17): أنبوب التضاعف الفوتوني

تحقيق النتيجة نفسها إذا كان جهد المجمع مساويا للصفر ثـم يتنـاقص الجهد حتى يصبح مساويا (V-) على المهبط. أي أنه يتم تغذيـة المهـبط بمنبع جهد سالب بدلا من تغذية المجمع بمنبع جهد موجب).

وهكذا، ينتج تضاعف عدد الإلكترونات على الـدينودات بسـبب ظاهرة الانبعاث الثانوي. فإذا كان معامل الانبعاث الثانوي على الـدينود الأول δ_1 وعلى الثاني δ_2 وعلى الأخير δ_n يكون معامل التضاعف الكلي لأنبوب هو:

$$M = \delta_1 \ \delta_2 \ldots\ldots\ldots \delta_n \qquad (4\text{-}26)$$

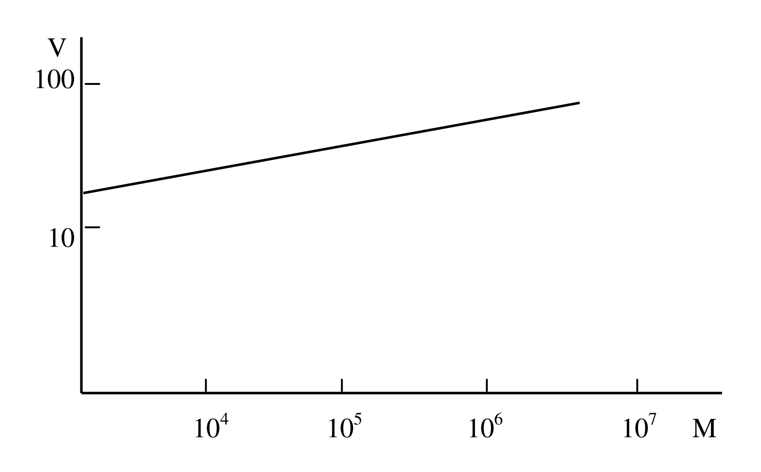
علما بأن معامل الانبعاث الثـانوي للـدينود هـو نسـبة عـدد الإلكترونات الصادرة منه إلى عدد الإلكترونات الساقطة عليه. فإذا كان عدد الدينودات في الأنبوب عشرة وكان معامل التضاعف المطلوب هـو 10^6 فيجب أن يكون معامل الانبعاث الثانوي علىكل دينود في حـدود 3.95 أي أن :

$$\delta_1 = \ \delta_2 = \ldots \ \delta_n \ = 3.95$$

ويعتمد معامل الانبعاث الثـانوي δ كـل دينـود علـى طاقـة الإلكترونات الساقطة عليه، حيث يزداد بزيادة الطاقة. ولما كانت الطاقة التي تكسبها الإلكترونات عند التحرك من دينود إلى آخر تتناسب طرديا مع فرق الجهد بين الدينودين، فإن معامل الانبعاث يتناسب بالتالي طرديا مع فرق الجهد بين الدينودين. لذا فإن معامل التضـاعف فـي أنبـوب التضاعف الفوتوني يعتمد اعتمادا كبيرا على مقدار الجهد V . ويوضح شكل (4−18) كيفية تغير معامل التضاعف كدالة من فرق الجهـد فـي العديد من أنابيب التضاعف. وعموما، فإنه يمكن التعبير عـن معامـل التضاعف رياضيا بالعلاقة التالية عند ثبوت عدد الدينودات:

$$M = K\,E^{I}$$

حيث: K ثابت يعتمد على نوع الأنبوب، E شدة المجال الكهربائي بين كل دينودين، I عدد يساوي 5 تقريبا.



شكل (4-18)
تغير معامل التضاعف كدالة من فرق الجهد في أنبوب التضاعف الفوتوني

وهكذا، يلاحظ أن أنبوب التضاعف الفوتوني يؤدي إلى تكبير النبضة الكهربائية الناتجة عن الجسيم النووي في حدود تتراوح بين حوالي 10^3 ، 10^7 مرة تبعا لقيمة الجهد المستخدم لتغذية الأنبوب. وتعتبر هذه القيمة العالية لمعامل التكبير (التضاعف) من أهم مزايا الكواشف الوميضية بالمقارنة بالكواشف الغازية حيث يمكن الاستغناء عن المكبرات (المضخمات) الإلكترونية المستخدمة مع غرف التأين والعداد التناسبي أو استخدام مكبرات ذات معامل منخفض للتكبير.

4-10-4 القدرة التحليلية للطاقة الزمن للكواشف الوميضية

Energy and time resolution of the scintillation detectors

عند ثبوت الجهد في أنبوب التضاعف عند قيمة معينة تكون قيمة معامل التضاعف ثابتة. وعندئذ يجب أن يتناسب اتساع نبضة التيار (أي القيمة القصوى للتيار) مع طاقة الجسيم النووي تناسبا طرديا. ومع ذلك فإنه يلاحظ أن اتساع نبضة التيار الناتجة عن الأنود تختلف اختلافا

طفيفا للجسيمات نفسها ذات الطاقة الواحدة. ويرجع هذا الاختلاف الطفيف في القيمة القصوى للتيار وبالتالي في القيمة القصوى لجهد النبضة إلى الآتي:

1- اختلاف عدد الفوتونات التي تصل للمهبط الضوئي من المادة الوميضية بسبب امتصاص بعضها في المادة .

2- اختلاف التضاعف داخل الأنبوب اختلافا طفيفا وخاصة على الدينود الأول وذلك لأن معامل الانبعاث الثانوي يعتمد على زاوية سقوط الإلكترون على الدينود فضلا عن أن عملية الانبعاث الثانوي تعتبر عملية إحصائية بحتة.

لذلك، فإنه عند الكشف عن جسيمات ذات طاقة واحدة E يحدث توزع في طاقتها مقداره ΔE ، ويمكن إيجاد القدرة التحليلية r للكاشف الوميضي بالأسلوب نفسه المتبع للكواشف الأخرى، وهي:

$$r = (\Delta E / E) \times 100\,\%$$

وتجدر الإشارة إلى أن زيادة القدرة التحليلية يعني انخفاض قيمة r . فمثلا، إذا كانت $r = 0.25\ \%$ فيقال أن هذا الجهاز ذو قدرة تحليلية عالية، وأما إذا كانت $r = 2.5\ \%$ فيقال أن الجهاز ذو قدرة تحليلية أقل. ويمكن زيادة القدرة التحليلية للكواشف الوميضية وذلك باستخدام مادة وميضية عالية الشفافية، وتوجيه عناية خاصة إلى أنبوب توصيل الضوء، وعدم ترك أي فقاعات هوائية بين المادة الوميضية وأنبوب التوصيل الضوئي أو بين هذا الأنبوب وأنبوب التضاعف الفوتوني، حتى لا يتشتت الضوء على هذه الفقاعات، مما يؤدي إلى حدوث توزع كبير في عدد الفوتونات التي تصل المهبط. كذلك، فإنه لتقليل التوزع الناتج عن أنبوب التضاعف الفوتوني، وبالتالي لرفع تركيز الإلكترونات وزيادة حساسية المهبط الضوئي وزيادة معامل التضاعف لكل دينود على حدة، وخاصة الدينود الأول، حيث يكون عدد الإلكترونات ما زال قليلا وإمكانية التوزع كبيرة. لذلك، فإنه يفضل استخدام الجهود العالية التي

تحقق معامل تضاعف كبير، بشرط ألا يتجاوز الجهـد المطبـق الحـد الأقصى للجهد المسموح به على الأنبوب المعين لتلاشي حدوث شـرارة كهربية بين الدينودات، وبالتالي لتلاشي تلف الأنبوب كله. كذلك، فإنـه يفضل أن يكون فرق الجهد بين الدينود الأول وماقبله أعلى بعدة مـرات من فرق الجهد بين أي دينودين تاليين.

وتتراوح القدرة التحليلية، عموما، للكواشف الوميضية بين 2 %، 20 % وذلك تبعا لحجم المادة الوميضية، حيث تنخفض القدرة التحليلية للطاقة بزيادة حجم البلورة (المادة الوميضية).

أما القدرة التحليلية الزمنية (time resolution) فهي عبـارة عـن الفاصل الزمني بين جسيمين متتابعين بحيث يسـجلان منفصـلين عـن بعضهما البعض زمنيا. وأهم العوامل التي تحدد القدرة التحليلية الزمنية للكواشف الوميضية هي زمن التفكك للمادة الوميضية وزمـن التـأخير الناتج عن انتقال الإلكترونات في أنبوب التضاعف الفوتوني. ويتـراوح هذا الزمن الأخير بين 10^{-8} ، 10^{-7} ثانية تبعا لنوع وحجـم الأنبـوب والجهد المستخدم حيث يتناسب هذا الزمن عكسيا مع الجـذر التربيعـي للجهد المستخدم .

كذلك، تجدر الإشارة إلى أنه يحدث اختلاف في زمـن الانتقـال، وذلك بسبب مرور الإلكترونات في مسارات مختلفة عند انتقالهـا بـين الدينودات، إلا أن هذا الاختلاف لا يتجاوز عادة 7×10^{-10} ثانية.

5-10-4 استخدام الكواشف الوميضية

تستخدم الكواشف الوميضية للكشف عن جميع أنواع الإشعاعات المؤينة وتسجيلها بالأسلوب النبضي وتحديد طاقاتها. ولهـذا الغـرض يستخدم كاشف وميضي مكون من مادة وميضية مناسبة للنوع المعين من الإشعاعات وأنبوب تضاعف فوتوني. ويوصل مخرج الأنبـوب وهـو المجمع (الأنود)، أو الدينود الأخير السـابق مباشـرة للمجمـع بـدارة إلكترونية تعرف باسم التابع الباعثي أو المكبر الأولـي (preamplifier).

ويجب تجميع هذه الدارة على قاعدة الأنبوب مباشرة لمنع فقد نسبة من التيار عند سحبه لمسيفات بعيدة. كذلك، يتم تجميع دارة مقسم الجهد (potential - divider) ، اللازم لتوزيع الجهد على الدينودات المختلفة على هذه القاعدة نفسها. وتؤخذ نبضات الجهد الخارجة من التابع الباعثي أو المكبر الأولي لعد عددها أو لتحليل طاقاتها في أجهزة أخرى. ويتم تغذية أنبوب التضاعف بمنبع جهد عال ذي استقرارية عالية.

وتجدر الإشارة إلى أنه يؤخذ أحيانا مخرجان من أنبوب التضاعف، الأول من المجمع (الأنود)، ويكون تياره سالبا نظرا لأنه ناتج عن وصول الإلكترونات السالبة للمجمع. ويؤخذ المخرج الآخر من أحد الدينودات الأخيرة ويكون تياره موجبا نظرا لأنه ناتج عن خروج عدد من الإلكترونات من هذا الدينود أكبر من العدد الذي يصله من الدينود السابق له. ويكون عادة جهد النبضة الموجبة من الدينود أصغر من جهد النبضة السالبة من المجمع.

أ- استخدام الكواشف الوميضية للكشف عن جسيمات ألفا والجسيمات المشحونة الثقيلة

للكشف عن جسيمات ألفا والجسيمات المشحونة الثقيلة الأخرى بواسطة الكواشف الوميضية يفضل استخدام بلورة وميضية من كبريتيد الخارصين المنشط بالفضة ZnS(Ag) . وتتميز هذه البلورة بكفاءة عالية لتحويل طاقة جسيمات ألفا والجسيمات المشحونة الثقيلة الأخرى إلى طاقة ضوئية. ومن الجانب الآخر فإن أهم عيوب هذه البلورة هو ضعف شفافيتها. إلا أنه نظرا لصغر مدى الجسيمات المشحونة الثقيلة فإنه يستخدم سمك صغير من هذه المادة (حوالي 1 مم) مما يجعل ضعف الشفافية غير ذي أهمية. ويمكن ترسيب مادة كبريتيد الخارصين مباشرة على زجاج أنبوب التضاعف الفوتوني، دون الحاجة لأنبوب توصيل الضوء.

ب- استخدام الكواشف الوميضية للكشف عن إشعاعات جاما والإشعاعات السينية

للكشف عن إشعاعات جاما أو الأشعة السينية باستخدام الكواشف الوميضية تستخدم، عموما، بلورة يوديد الصوديوم المنشـطة بالثـاليوم NaI(Tl) كمادة وميضية. ويفضل استخدام هذا النوع من البلـورات مـع الأشعة السينية وإشعاعات جاما بسبب كفاءتها العالية نظرا لكبر كثافتهـا وكبر العدد الذري للثاليوم واليود. وتعتمد كفاء الكاشف على كـل مـن سمك البلورة وطاقة الإشعاعات. فعند الطاقة المعينة تزداد الكفاءة كلمـا زاد سمك البلورة. وأما بالنسبة للسمك المعين فتقل الكفاءة بالنسبة لكـل من الأثر الكهروضوئي وأثر كومبتون بزيادة الطاقـة وتـزداد الكفـاءة بالنسبة لإنتاج الأزواج كلما زادت الطاقة (راجـع الفصـل الثالـث). وعموما، فإن كفاءة الكواشف الوميضية بالنسبة لإشعاعات جاما تعتبـر أعلى من كفاءة العدادات الغازية لهذا النوع من الإشعاعات بحوالي عدة عشرات أو حتى عدة مئات من المرات.

ج- استخدام الكواشف الوميضية للكشف عن جسيمات بيتا

على الرغم من أن جميع أنوع المواد الوميضية تعتبـر حساسـة بالنسبة لجسيمات بيتا بدرجات متفاوتة، إلا أنه يفضل دائمـا اسـتخدام المواد الوميضية العضوية للكشف عن هذه الجسيمات. ويرجع السبب في ذلك إلى الآتي:

1- صعوبة استخدام بلورة يوديد الصوديوم المنشطة بالثاليوم NaI(Tl) للكشف عن الإلكترونات نظـرا لضـرورة عزل هذه البلورة عن الهواء الجوي بواسطة حافظة محكمـة القفل حتى لا تتميع، وبالتالي صعوبة عمل النافذة.
2- يعتبر الوزن الذري الكبير لبلورة يوديد الصوديوم من أهم عيوبها بالنسبة للكشف عن جسيمات بيتا حيث ينـتج عنه نسبة عاليـة مـن تشـتت هـذه الجسـيمات للخلـف (backscattering) في مادة البلورة.

د- استخدام الكواشف الوميضية للكشف عن النيوترونات

يوجد في الوقت الحالي عـدة مـواد وميضـية للكشـف عـن النيوترونات. ويتم الكشف عنها خلال الجسيمات المشحونة الناتجة عـن تفاعل النيوترونات مع المادة الوميضية. وبالنسبة للنيوترونات الحرارية تستخدم أي من مادتي الليثيوم Li أو البور B ، حيث تتفاعل النيوترونات الحرارية مع أي من هاتين المادتين مع انبعاث جسـيمات ألفـا بطاقـة كبيرة. كما أن المقطع العرضي لهذه التفاعلات يعتبر كبيرا، مما يـؤدي إلى زيادة كفاءة الكاشف.

لذلك، تستخدم عادة بلورة يوديد الليثيوم المنشطة بالثاليوم LiI(Tl) للكشف عن النيوترونات الحرارية. وتتميز هذه البلورة بخواص مشابهة لخواص بلورة يوديد الصوديوم. وفي بعـض الكواشـف النيوترونيـة الأخرى تستخدم بلورة مكونة من خليط من مركبات الليثيوم أو البور مع كبريتيد الخارصين.

أما بالنسبة للنيوترونات السريعة فإنـه يفضـل الكشـف عنهـا باستخدام البروتونات المرتدة عنـد تشـتت هـذه النيوترونـات علـى الهيدروجين. ولهذا الغرض تجهز البلورة في شكل خليط مـن حبيبـات كبريتيد الخارصين ZnS والشمع لاحتوائـه علـى نسـبة عاليـة مـن الهيدروجين. وتعتبر هذه البلورة من أنسـب البلـورات للكشـف عـن النيوترونات السريعة.

وتوجد عدة أنواع من كواشف النيوترونات السريعة التـي تعتمـد أساسا في عملها على التفاعل (n , γ) . ويستخدم لهذا الغرض عدة مـواد ذات مقاطع عرضية عالية لهذا النوع من التفاعل مثل الإنديوم والـذهب حيث تحدث بينها وبين النيوترونات السريعة التفاعلات التالية:

$$^{115}_{49}In + n \longrightarrow {}^{116}_{49}In + \gamma$$

$$^{197}_{79}Au + n \longrightarrow {}^{198}_{79}Au + \gamma$$

وتعتبر المواد الناتجة عن التفاعل وهي الإنديوم ^{116}In والـذهب ^{198}Au مصادر مشعة لجسيمات بيتا. وبقياس النشـاط الإشـعاعي لهـذه المصادر يمكن الكشف عن النيوترونات السريعة وتحديد عددها.

11-4 الكواشف شبه الموصلة
The semiconductor (solid state) detectors

حدث في السنوات الأخيرة تحول كبير من الكواشف الغازية والوميضية إلى الكواشف المجهزة من أشبه الموصلات خاصة في مجال البحوث النووية عند الطاقات المنخفضة. ويرجع السبب في ذلك إلى المزايا العديدة التي تتمتع بها الكواشف شبه الموصلة التي سيرد ذكرها. وهناك تشابه كبير بين عمل الكواشف المجهزة من أشباه الموصلات وعمل غرفة التأين. ففي غرفة التأين تؤين الإشعاعات جزيئات الغاز مكونة بذلك أزواجا إلكترونية أيونية، يتم تجميعها والحصول بالتالي على نبضة جهد كهربائية. أما في الكواشف المجهزة من أشباه الموصلات فتؤين الإشعاعات ذرات المادة الصلبة شبه الموصلة مثل السليكون أو الجرمانيوم، مكونة بذلك أزواجا إلكترونية – ثقبية، يمكن تجميعها والحصول عليها ، بالتالي، منها على نبضة كهربائية. وتبلغ القيمة المتوسطة للطاقة اللازمة لتكوين زوج إلكتروني – ثقبي في مادة السيليكون أو الجرمانيوم حوالي 3 إلكترون فولت، (في حين أن هذه القيمة حوالي 35 إ.ف في الهواء). لذلك، فإن الشحنة المتكونة عن الجسيم النووي نفسه في السيليكون أو الجرمانيوم تبلغ تقريبا عشرة أضعاف الشحنة المتكونة في الهواء مما يؤدي بدوره إلى قدرة تحليلية فائقة للكواشف المجهزة من أشباه الموصلات، وبالتالي إلى دقة تحديد طاقة الجسيمات النووية. ونظرا لأن مدى الجسيمات النووية في المواد الصلبة أقل بكثير منه في الغازات فإنه يمكن استخدام كواشف من مواد صلبة بأعماق صغيرة. ويؤدي هذا بدوره إلى صغر الزمن اللازم لتجميع الشحنات الكهربائية، وبالتالي إلى قدرة تحليلية زمنية عالية بالنسبة لهذا النوع من الكواشف.

1-11-4 ثنائي الملتقى الثقبي الإلكتروني
The P-N junction diode

تتميز ذرات المواد رباعية التكافؤ مثل السيليكون والجرمانيوم بوجود أربعة إلكترونات في المدار الخارجي. وعندما تكون مادة

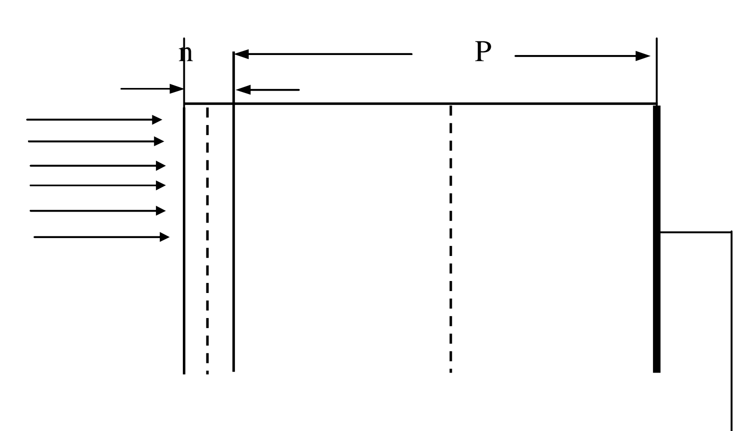
السيليكون أو الجرمانيوم في حالة متبلورة تنتظم ذرات المادة في نظـــام هندسي بحيث ترتبط كـــل ذرة مـــع أربـــع ذرات متجـــاورة بواســـطة إلكترونات التكافؤ الأربعة. لذلك، فإنه عند درجة حرارة الصفر المطلق يكون كل إلكترون من إلكترونات التكافؤ الأربعة مرتبطا في الوقت نفسه بذرتين، هما الذرة الأم والذرة المجاورة. ولا توجد، بذلك، أية إلكترونات حرة في المادة. لذلك تكـــون المـــادة عازلـــة تمامـــا. ولتحريـــر أحـــد الإلكترونات الأربعة المرتبطة بالذرتين في البلورة يجب منحـــه طاقـــة تصل إلى حوالي 0.72 إ.ف في حالة الجرمانيوم وحـــوالي 1.12 إ.ف في حالة السليكون. وعند وجود البلورة في درجة حرارة الغرفة أي 25 ْم (298ْ كلفين) تكتسب بعض إلكترونات التكافؤ في المادة هذه القيمـــة المطلوبة من الطاقة، فتتحرر هذه الإلكترونات وتصبح حرة تاركة فـــي مكانها ثقبا موجبا. وهكذا، يتكون زوج إلكتروني _ثقبـــي يـــؤدي إلـــى التوصيل الكهربائي للمادة. ولكن عدد الأزواج الإلكترونية الثقبيـــة فـــي المادة يكون قليلا للغاية ولا يتجـــاوز زوجـــا واحـــدا لكـــل 10^{11} ذرة للجرمانيوم وزوجا واحدا لكـــل 10^{13} ذرة ســـليكون. لـــذلك، تكـــون التوصيلة الكهربائية للمادة النقية شبه الموصلة صغير، أي أن مقاومتهـــا تكون عالية. وتجدر الإشارة إلى أن مقاومة السليكون تكون أعلى عـــادة بحوالي مائة مرة من مقاومة الجرمانيوم، عند درجة حرارة الغرفة نظرا لأن عدد الأزواج الإلكترونية الثقبية المتكونة في حالة السليكون تكـــون أقل منها في حالة الجرمانيوم. وتسمى الأزواج الناتجة عن المادة النقيـــة بحاملات الشحنة الذاتية.

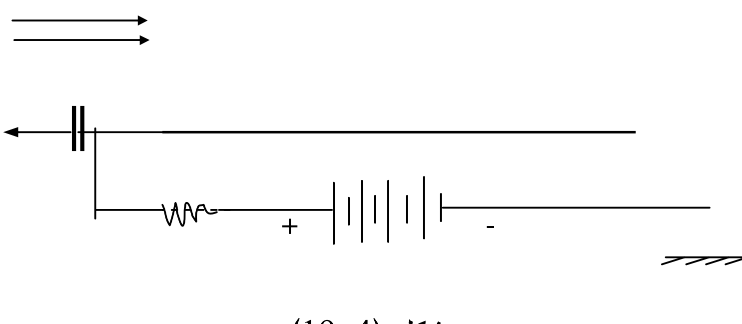
ولزيادة عدد الحاملات الحرة وبالتالي زيادة توصـــيلية البلـــورة يمكن إضافة نسبة صغيرة للغاية من شوائب خماسية التكافؤ إلـــى مـــادة السليكون أو الجرمانيوم النقي. فعند إضافة نســـبة مـــن ذرات خماســـية التكافؤ مثل الفسفور P (أو الزرنيخ As) إلى السليكون (أو الجرمانيوم) النقي ترتبط ذرة الفسفور (أو الزرنيخ) في البلورة بأربعة إلكترونات مع أربع من ذرات السليكون مكونة بـــذلك الـــروابط التســـاهمية الأربعـــة المطلوبة، ويبقى الإلكترون الخامس غير مرتبط مع أيـــة ذرة فيصـــبح إلكترونا حرا ويشترك في التوصيل الكهربائي. وتعرف الذرات خماسية التكافؤ في هذه الحالة بالذرات الواهبة (doner) ، حيـــث أنهـــا وهبـــت

إلكترونا حرا للبلورة. وتسمى المادة شبه الموصلة في هذه الحالة بالمادة الإلكترونية (n-type-material) لأن الإلكترونات تكون هي الحاملات الغالبية للشحنة، أما الثقوب فلا يوجد منها إلا الذاتية وتعرف عندئذ بالحاملات الأقلية.

كذلك، يمكن زيادة التوصيل الكهربائي للمادة وذلك بغرس شوائب من مواد ثلاثية التكافؤ كالبور B أو الجاليوم Ga. فعند تكوّن البلورة ذات الشوائب ترتبط ذرة البور بإلكتروناتها التكافؤية الثلاثة مع ثلاث ذرات سليكون مجاورة مكونة بذلك ثلاث روابط تساهمية. ولتكوين الرابطة الرابعة تستأثر ذرة البور بأحد الإلكترونات من إحدى ذرات السليكون المجاورة. وبذلك، يتكون في ذرة السليكون المجاورة ثقب موجب الشحنة. وتسمى ذرات المادة الثلاثية التكافؤ في هذه الحالة بالذرات المتقبلة (acceptor) حيث أنها تستقبل إلكترونا من كل ذرة مجاورة مكونة بذلك ثقب. وتعرف المادة شبه الموصلة في هذه الحالة بالمادة ثقبية التوصيل (p-type material) حيث أن الثقوب تمثل الحاملات الغالبية في هذه المادة، أما الإلكترونات فلا يوجد منها إلا الذاتية وهي بذلك تمثل الحاملات الأقلية.

وتضاف الشوائب عموما بنسب صغيرة جدا (حوالي ذرة واحدة لكل مليون ذرة سليكون أو جرمانيوم نقي). وعند إضافة الشوائب الخماسية إلى جزء من المادة النقية والشوائب الثلاثية إلى الجزء الآخر من نفس القطعة من المادة النقية يتكون ما يعرف باسم ثنائي الوصلة أو ثنائي الملتقى (The P-N junction diode) كالمبين في شكل (4−19). وعند الملتقى تنتقل إلكترونات التوصيل الحرة من المادة الإلكترونية إلى المادة الثقبية (بظاهرة الانتشار) تاركة خلفها الأيونات الموجبة. كما تنتقل الثقوب الموجبة (بالظاهرة نفسها) من المنطقة الثقبية إلى المنطقة





شكل (4-19)
ثنائي الوصلة (الكواشف شبه الموصلة)

الإلكترونية، تاركة خلفها الأيونات السالبة. وبذلك، تتكون على جانبي الملتقى منطقة تعرف باسم منطقة الاستنفاد (The depletion layer) تكون خالية تماما من الشحنات الكهربائية الحرة (سواء الإلكترونات أو الثقوب). وتعتبر هذه المنطقة عازلة تماما ويتكون فيها مجال كهربائي شدته E ناتج عن الأيونات الموجب والسالبة غير القابلة للحركة لارتباط كل منها بأربعة روابط تساهمية مع أربعة ذرات مجاورة. وفي حالة عدم توصيل جهد كهربائي بطرفي الثنائي يتراوح عرض منطقة الملتقى بين 10^{-3}، 10^{-5} سم، وذلك تبعا لنسب تركيز الشوائب. فكلما زاد تركيز الشوائب قل العرض والعكس صحيح. وعند توصيل جهد مباشر (أي القطب الموجب لمنبع الجهد بالمادة الثقبية والقطب السالب بالمادة الإلكترونية) بين طرفي الثنائي يقل عرض هذه المنطقة ويصبح مساويا للصفر عند حوالي 0.5 فولت، ويمر عندئذ، تيار كبير يعرف بالتيار المباشر. أما عند توصيل جهد عكسي بطرفي الثنائي (أي عكس اتجاه القطبية) يزداد عرض هذه المنطقة. ويمر تيار صغير جدا يعرف بالتيار العكسي للثنائي. ولا يعتمد التيار العكسي على قيمة الجهد العكسي وإنما تكون قيمته ثابتة (طالما كان الجهد العكسي أعلى من حوالي 0.5 فولت)، وإنما يعتمد التيار العكسي على درجة الحرارة، حيث أنه ناتج عن الإلكترونات والثقوب الذاتية الناتجة عن المادة شبه الموصلة النقية. لذلك، يكون التيار العكسي في حالة الجرمانيوم أعلى بكثير منه في حالة السليكون. ويتم توصيل الجهد المباشر، كما ذكر، بتوصيل القطب

الموجب لمنبع الجهد بالمادة الثقبية والقطب السالب بالمادة الإلكترونية، أما الجهد العكسي، فهو كالمبين في شكل (4−19) حيث يوصل القطب الموجب بالمادة الإلكترونية والقطب السالب بالمادة الثقبية.

4−11−2 كواشف السليكون The silicon detectors

كاشف السليكون عبارة عن ثنائي ملتقى ثقبي إلكتروني. ويكون عرض المادة الإلكترونية أقل من 1 ميكرومتر حتى لا تفقد الإشعاعات الساقطة جزءا كبيرا من طاقاتها فيه. ونظرا لصغر عرض المادة الإلكترونية يجب أن يكون تركيز الشوائب الخماسية فيها عاليا. وأما المادة الثقبية فيمكن أن تمتد لعمق يصل إلى عدة ملليمترات. ويمكن إيجاد عرض منطقة الملتقى d عند تحييز الكاشف بجهد عكسي (أي توصيله بجهد عكسي) من العلاقة التالية:

$$d = d_n + d_p \qquad (4\text{-}28)$$

حيث:

$$d_p = \varepsilon (V)^{1/2} / 2 \pi e N_P \quad , \quad d_n = \varepsilon (V)^{1/2} / 2 \pi e N_n$$

وحيث: V هي جهد التحييز العكسي، ε ثابت العزل للمادة، e شحنة الإلكترون أو الثقب، N_n هي كثافة الإلكترونات في المنطقة الإلكترونية (أي عدد الإلكترونات الحرة لوحدة الحجم)، N_p هي كثافة الثقوب في المنطقة الثقبية.

وتعتبر منطقة الاستنفاد هي المنطقة الحساسة للكاشف. ويتناسب عدد الأزواج الإلكترونية الثقبية الناتج في هذه المنطقة عن الجسيم النووي الساقط تناسبا طرديا مع الطاقة التي يفقدها هذا الجسيم في هذه المنطقة. ويتم سحب هذه الأزواج وتجميعها تحت تأثير المجال الكهربائي لمنطقة الاستنفاد، حيث تتجه الإلكترونات الناتجة إلى المنطقة الإلكترونية وتتجه الثقوب إلى المنطقة الثقبية، مما يؤدي إلى مرور تيار كهربائي وظهور نبضة كهربائية على مخرج الكاشف.

وفي حالة اجتياز الجسيم النووي لمنطقة الاستنفاد ودخوله إلـــى المنطقة الثقبية فإنه يولد، كذلك، أزواجا إلكترونية ثقبية في هذه المنطقة. إلا أن هذه المنطقة لا تحتوي إلا على عدد قليل جدا مـــن الإلكترونـــات الحرة وعدد كبير جدا من الثقوب. لذلك، تتحرك الثقوب كعادتها في هذه المنطقة ولكن الإلكترونات المتولدة يمكن أن تعيد اتحادها مع العدد الكبير من الثقوب فيضيع جزء كبير من التيار. وبالتالي لا تتناســب الشــحنة المتجمعة مع الطاقة التي يفقدها الجسيم في هذه المنطقة. كــذلك الأمــر بالنسبة للمنطقة الإلكترونية. فعند مرور الجســيم النــووي بهــا تتولــد الأزواج الإلكترونية الثقبية. ولما كانت الثقوب في هذه المنطقة عبــارة عن أقلية والإلكترونات هي الغالبية فإنه يمكن أن تعيد الثقوب المتكونــة اتحادها مع الإلكترونات، وبالتالي يُفقد عدد كبير من هذه الثقوب ويضيع جزء من التيار. لذلك، يجب أن يكون عــرض المنطقــة الإلكترونيــة صغيرا للغاية، وأن يكون عرض منطقة الاستنفاد كافيا بحيــث يتوقــف الجسيم النووي قبل الوصول إلى نهايتها، وذلك للمحافظة على التناســب بين طاقة الجسيم النووي وعدد الأزواج الإلكترونية الثقبية المتجمعة، أي بين طاقة الجسيم والنبضة الكهربائية الناتجة على مخرج الكاشف.

ويعتمد الزمن اللازم لتجميع الأزواج الإلكترونية الثقبية على عدة عوامل، مثل عرض منطقة الاستنفاد وبالتالي على الجهد العكسي، وعلى كثافة الشوائب. وتتحرك كل من الثقوب والإلكترونات تحت تأثير المجال الكهربائي لمنطقة الاستنفاد، وكذلك بفعل الحركة الحرارية العشــوائية. فالسرعة الانسياقية تحت تأثير المجال E عبارة عن:

$$v = \mu\mu E$$

وهي تختلف لكل من الثقوب والإلكترونات لاختلاف الحركيــة μ لكل منهما. والسرعةالانسياقية لأي من الثقوب والإلكترونات v لا تتعدى 10^{7} سم/ثانية مهما زاد الجهد. فإذا كان عرض منطقة الاستنفاد حوالي 0.1 سم فإن الزمن اللازم لتجميع الشحنة هو 10^{-8} ثانية، وهــذا هــو الحد الأدنى لزمن تجميع الشحنة. وعموما، يتوقف زمن نمو التيار مــن الصفر إلى أقصى قيمة له على عدة عوامل مثل السعة الداخلية للثنــائي

(للكاشف) ومقاومته الداخلية. ويتراوح هذا الزمن الأخير بين $3 x10^{-9}$ إلى 10^{-7} ثانية للكواشف شبه الموصلة المختلفة.

ويستخدم هذا النوع من الكواشف المجهز أساسا من مادة السليكون للكشف عن الجسيمات المشحونة الثقيلة كالبروتونات وجسيمات ألفا. وعموما، لا تستخدم مادة الجرمانيوم في هذا النوع من الكواشف نظرا لأن مقدار التيار العكسي الناتج عن الحاملات الأقلية في الجرمانيوم كبير ويقترب من التيار الناتج عن الجسيم النووي. وعند استعمال الجرمانيوم في تجهيز مثل هذه الكواشف فإنه يجب خفض حرارته إلى حوالي 77° كلفين (أي حوالي 196 تحت الصفر المئوي) حتى لا يتكون عدد كبير من الحاملات الذاتية، وبالتالي حتى يمكن إهمال قيمة التيار العكسي بالنسبة للتيار الناتج عن الجسيم النووي.

3-11-4 كواشف الجرمانيوم – ليثيوم

Germanium -lithium detectors

للكشف عن جسيمات بيتا وإشعاعات جاما فإنه يفضل استخدام مادة الجرمانيوم نظرا لكثافتها العالية وكبر عددها الذري. كذلك، يجب أن يكون عرض المنطقة الحساسة (منطقة الاستنفاد) كبير نسبيا (من 1-3مم) حتى تتوقف خلالها جسيمات بيتا أو الإلكترونات الناتجة عن الأثر الكهروضوئي لإشعاعات جاما. ولهذا الغرض يتم غرس ذرات الليثيوم في مادة الجرمانيوم، وذلك لزيادة مقاومة المادة شبه الموصلة. فعند غرس ذرات الليثيوم في مادة الجرمانيوم من النوع الثقبي يقل عدد الثقوب الغالبية فيها، وبذلك تصبح توصيليتها قريبة من توصيلية المادة النقية، مما يؤدي بدوره إلى زيادة عرض منطقة الاستنفاد حتى عند الجهود العكسية الصغيرة. ويتم غرس ذرات الليثيوم بطرق تكنولوجية مختلفة باستخدام جهود معينة ودرجات حرارة محددة لفترات زمنية طويلة (حوالي عشرة أيام متصلة لإعداد 2 سم من الجرمانيوم المغروس بالليثيوم).

وتجدر الإشارة إلى أن زيادة حجم المنطقة الحساسة (منطقة الاستنفاد) تؤدي بالتالي إلى زيادة التيار العكسي. وحيث أن هذا التيار

يعتمد أساسا على درجة حرارة المادة شبه الموصلة فإنه يجب خفض قيمتها، وذلك بتبريد كاشف الجرمانيوم حتى درجات حرارة منخفضة (حوالي−196 ْم). بالإضافة إلى ذلك، فإنه عند ترك الجرمانيوم المغروس بالليثيوم عند درجة حرارة الغرفة، فإنه حتى في حالة عدم توصيل الجهد العكسي إليه يمكن أن يحدث انسياق لذرات الليثيوم فتتحرك نحو السطح. وبالتالي، تفقد هذه الذرات من الجرمانيوم بفعل حركنها الحرارية ويتلف الكاشف في الحال. وتعتبر هذه المشكلة في غاية الخطورة بالنسبة للكواشف المجهزة من الجرمانيوم عنها بالنسبة لتلك المجهزة من السليكون. ولهذا يجب المحافظة على الكاشف باستمرار تحت درجة حرارة منخفضة (196ْم تحت الصفر) أي تحت تأثير حرارة النيتروجين السائل. كذلك، فإنه من المفضل الإبقاء على الكاشف تحت تأثير جهد عكسي مع التبريد بشرط ألا يتغير هذا الجهد العكسي تغيرا مفاجئا بالزيادة أو النقص.

4−11−4 كواشف الجرمانيوم عالية النقاء

The hyper pure germanium detector

بسبب سرعة تلف كواشف الجرمانيوم ليثيوم بمجرد نفاذ النيتروجين السائل من وارتفاع درجة حرارته قرب درجة حرارة الغرفة وبعد أن تمكن العلماء من تحضير أحجام مختلفة من بلورات الجرمانيوم عالية النقاء وبالتالي من زيادة مقاومة الجرمانيوم المحيز عكسيا لخفض التيار العكسي، حلت كواشف الجرمانيوم عالية النقاء محل كواشف الجرمانيوم ليثيوم. ولم تعد درجة الحرارة المنخفضة (أي درجة حرارة النيتروجين السائل) مطلوبة إلا قبل توصيل جهد التحييز العكسي للكاشف. أي قبل تشغيل الكاشف بعدد محدود من الساعات.

4−11−5 أهم مزايا الكواشف شبه الموصلة

تتميز الكواشف المجهزة من أشباه الموصلات بالمقارنة بالكواشف الغازية والوميضية بعدة مزايا أهمها ما يلي:

أ- قدرة تحليلية فائقة للطاقة حيث تصل القـــدرة التحليليـــة لكواشف الجرمانيوم ليثيـــوم إلـــى حـــوالي 1.7 ك.إ.ف بالنسبة لإشـــعاعات جامـــا ذات الطاقـــة 1332 ك.إ.ف والصادرة من نظير الكوبالت60 الذي يعتبر بمثابة معيار لهذه الخاصية. أما كواشف الجسيمات المشحونة الثقيلـــة والمجهزة من السليكون فتصل قـــدراتها التحليليـــة إلـــى حوالي 0.3 % . وهذا أفضل بكثير من القدرة التحليليـــة لغرفة التأين (وهي أفضل الأجهزة الغازية مـــن حيـــث قدرتها على فصل الطاقات المختلف) ومن القدرة التحليلية للكواشف الوميضية. ويرجع السبب في ذلك إلى زيـــادة عدد الأزواج الإلكترونية الثقبية بحوالي عشر مرات عن الأزواج الإلكترونية الأيونية الناتجة في غرفة التأين مما يؤدي إلى نقص التراوح الإحصائي النســـبي فـــي عـــدد الأزواج. كذلك، فإنه نتيجة لصغر حجم المنطقة الحساسة للكاشف شبه الموصل فإن التراوح الناتج عن احتمال فقد بعض الأزواج ينخفض انخفضا ملموسا.

ب- وجود علاقة خطية بين طاقة الجسيم النـــووي واتســـاع النبضة الكهربائية (أي أقصى ارتفاع لها) الناتجة عنـــه، وذلك ضمن مدى عريض من الطاقات طالما كان عرض المنطقة الحساسة كافيا.

ج- قصر زمن النبضة الكهربية الناتجة عن الجســـيم بســـبب صغر حجم المنطقة الحساسة. ويؤدي ذلك إلى إمكانية عد وتحليل معدل عال للجسيمات يصل إلـــى حـــوالي 10^6 جسيم/ثانية.

د- إمكانية تغيير عرض المنطقة الحساسة وذلك بتغيير الجهد العكسي.

هـ- إمكانية فصل الأنواع المختلفة من الجسيمات المشـــحونة الثقيلة عن بعضها. فعندما تحتوي الجســـيمات الســـاقطة على البروتونات وجسيمات ألفا مثلا، يمكن اختيار جهـــد عكسي صغير (في حدود عدد فولتات)، بحيث لا يزيـــد عرض المنطقة الحساسة عن مدى جسيمات ألفا. ولكـــن

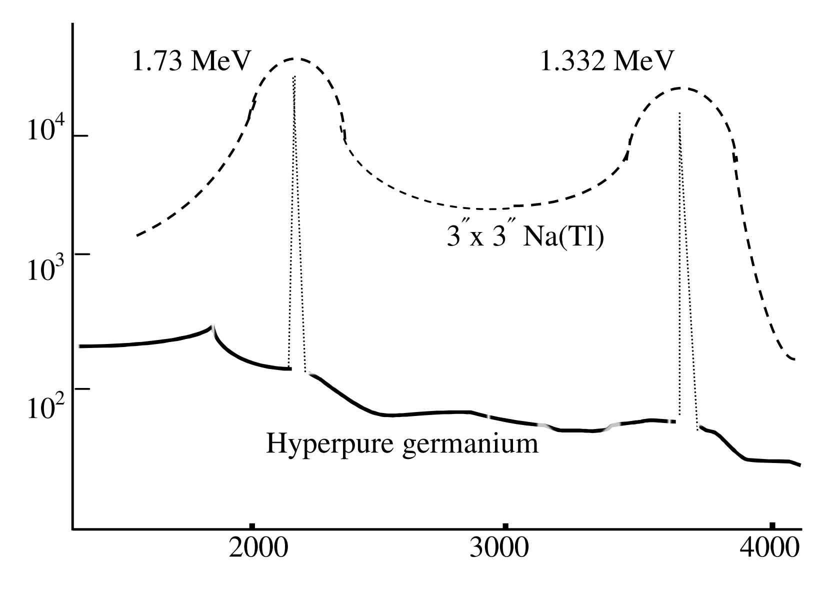
البروتونات تمر من هذا العرض دون أن تفقـــد جـــزءا ملموسا من طاقها، فيتم بذلك تسجيل جسيمات ألفـــا دون البروتونات.

و- صغر حجم الكاشف وسهولة التعامل به.

ز- عدم الحساسية بالنسبة لتغير المجال المغناطيسي.

ح- إمكانية إعداد الكاشف علـــى أشـــكال هندســـية مختلفـــة كالكواشف ذات الثقـــب المحـــوري (annular detectors)، وذلك لإجراء القياسات عند الزوايا القريبة من 180°.

ويمكن المقارنة بين القدرة التحليلية للكواشف المجهزة من أشـــباه الموصلات والكواشف الوميضية بالنظر إلى شكل (4−20)حيث يظهـــر طيف إشعاعات جاما الصادرة من نظير الكوبالت 60 (والـــذي يشـــع إشعاعات جاما بطاقتين هما 1173 ك.إ.ف ، 1332 ك.إ.ف) باستخدام كاشف جرمانيومي وآخر وميضي. ويتضـــح من هذا الشـــكل القـــدرة



شكل (4−20)

المقارنة بين القدرة التحليلية لكواشف

يوديد الصوديوم Na(Tl) وكواشف الجرمانيوم

التحليلية العالية للكواشف المجهزة من أشباه الموصلات بالمقارنة بالكواشف الوميضية.

ومن جهة أخرى توجد للكواشف المجهزة من أشباه الموصلات بعض العيوب الأساسية. وتتلخص هذه العيوب في الآتي:

أ- عدم القدرة على استخدامها للكشف عن الجسيمات ذات المدى الطويل أي عند الطاقات العالية.

ب- قصر عمر الكاشف نسبيا بسبب حدوث تغيرات في تركيب المادة وخاصة عند السطح، وكذلك لحدوث تلف إشعاعي لها (radiation damage) نتيجة تعرضها لإشعاعات كثيفة، خاصة النيوترونات.

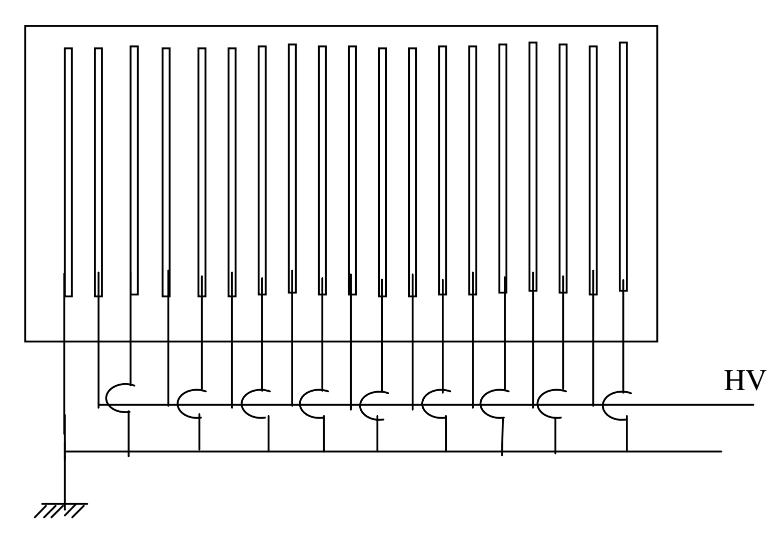
ج- ضرورة التبريد وعدم إمكانية التشغيل عند درجات الحرارة المرتفعة.

د- زيادة زمن النبضة بالنسبة للكواشف ذات الأحجام الكبيرة.

12-4 العداد الشراري The spark counter

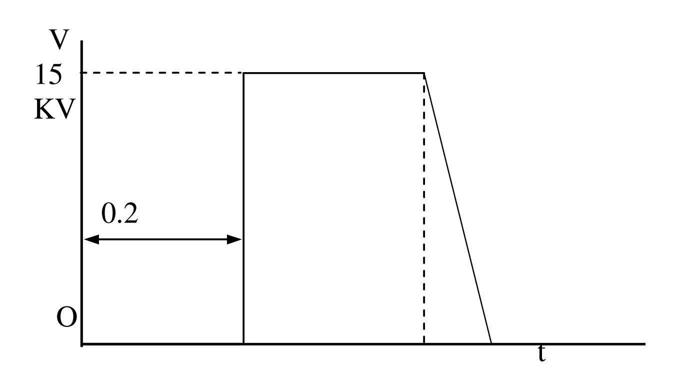
يتكون العداد الشراري (شكل 4-21) من غرفة مملوءة بغاز خامل مثل النيون تحت ضغط قريب من الضغط الجوي. ويوضع في الغرفة عدة ألواح فلزية رقيقة متتابعة. وتتراوح المسافة بين كل لوحين ما بين 2-20مم. ويزداد عدد الألواح أو يقل حسب الغرض المخصص له العداد. وفي بعض العدادات المستخدمة عند الطاقات العالية يصل عدد هذه الألواح إلى أكثر من 130 لوحا. وتوصل الألواح بالتتابع بقطبي منبع جهد عال متردد يصل جهده إلى حوالي 10-15 كيلو فولت. وعند مرور أي جسيم مشحون بين الألواح فإنه يؤين ذرات النيون على طول مساره. عندئذ، تصل نبضة الجهد العالي (10-15 ك.ف) للألواح. ونظرا لوجود فرق جهد عال بين كل لوحين متجاورين ووجود الإلكترونات الناتجة عن التأين بين الألواح تحدث شرارة كهربية بين كل لوحين.

وعموما، يجب إدخال نبضة الجهد العالي إلى الألواح بعد دخول الجسيم بفترة زمنية تصل إلى حوالي 0.2 ميكروثانيـــة وتســـتمر هـــذه النبضة إلى أن تحدث الشرارة الكهربائية. ويبين شكل (4−22) توقيـــت دخول نبضة الجهد العالي بالنسبة لزمن دخول الجسيم الذي يعتبر $t = 0$.

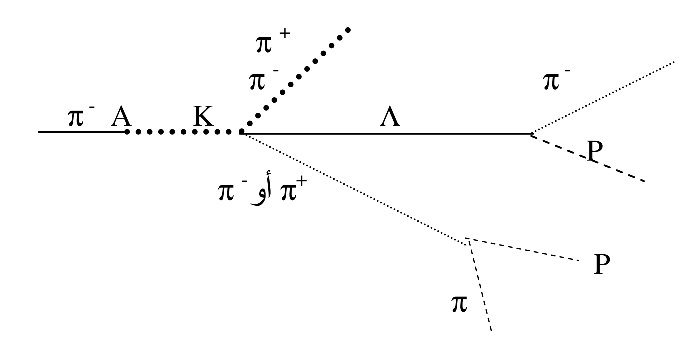


شكل (4−21)
العداد الشراري

وهكذا، تحدث شرارة كهربائية مرئية على طول مسار الجســـيم المشحون. وفي حالة حدوث تفاعلات نووية أخرى وخـــروج جســـيمات مشحونة نتيجة لتصادم الجسيم النووي الساقط مع النوى الموجودة داخل الغرفة تظهر كذلك آثار هذه الجسيمات الجديدة في شكل شرارات كهربية موضحة بذلك مسارها. ويبين شكل (4−23) مسار باي − ميـــزون (π) والتفاعلات الناتجة عند مروره داخل العداد وتفاعله منتجا عدة جسيمات نووية.



شكل (4−22)
توقيت دخول نبضة الجهد العالي بالنسبة لزمن دخول الجسيم (t = 0)



شكل (4−23)
مسار باي− ميزون والتفاعلات الناتجة عند مروره داخل العداد

ويمكن استخدام العداد الشراري في تحديد زخم الجسيم النووي الساقط، وذلك بوضع العداد داخل مجال مغناطيسي ثابت ومتجانس وتحديد الانحناء في المسار بدقة. ويتمتع العداد الشراري بقدرة تحليلية زمنية مساوية لقدرة العدادات الغازية. ويفضل هذا العداد عند الطاقات العالية على الغرفة الفقاعية، وذلك لأنه يمكن اختيار زمن دخول النبضة وتصوير الأثر بعد دخول الجسيم وخلال مدة زمنية معينة. كذلك، فإنه

يمكن سحب الأيونات من الغرفة باستخدام مجال كهربائي خلال مدة لا تزيد على 2 ميكرو ثانية من التصوير.

13-4 كواشف تشرنكوف Cerencov detectors

لاحظ تشيرنكوف أنه عند مرور جسيمات مشحونة في مادة عازلة بسرعة أعلى من السرعة الطورية للضوء في هذه المادة، فإنه ينتج عن ذلك انبعاث إشعاعات كهرومغناطيسية ضعيفة، يكون ترددها في حدود الضوء المرئي. وتختلف هذه الإشعاعات (المعروفة باسم إشعاعات تشرنكوف) في طبيعتها عن إشعاعات الانكباح، حيث أنها لا تعتمد على العدد الذري للمادة ولا على سرعة الجسيم الساقط.

ويمكن فهم طبيعة إشعاعات تشرنكوف كالتالي:

عند مرور جسيمات مشحونة بسرعات عالية فإنه تصاحبها نبضة كهرومغناطيسية (مجال كهرومغناطيسي متغير زمنيا). وتؤدي هذه النبضة إلى استقطاب ذرات المادة عن طريق إزاحة الإلكترونات المرتبطة بالذرات على طول مسار الجسيم الساقط. وحيث أن هذا الاستقطاب يتغير زمنيا بسبب تغير المجال الكهرومغناطيسي فإنه ينتج عن ذلك إصدار الذرة لإشعاعات في شكل موجات كهرومغناطيسية. فإذا كان الجسيم متحركا بسرعة صغيرة فإن الإشعاعات الصادرة عن الذرات تتداخل تداخلا هداما (destructive interference) عند نقطة بعيدة فتكون شدة الضوء عند هذه النقطة مساوية للصفر. أما إذا كان الجسيم متحركا بسرعة v أعلى من السرعة الطورية (phase velocity) للضوء في هذه المادة، فإنه يمكن أن يكون التداخل عند هذه النقطة البعيدة تداخلا بناءً (constructive interference) ، وبذلك تختلف شدة الضوء عند هذه النقطة عن الصفر. ويمكن إيجاد شروط التداخل البناء من شكل هويجن (Huygen`s construction) (شكل 4-24). فخلال فترة زمنية مقدارها Δt ينتقل الجسيم مسافة مقدارها:

$$AB = v\,\Delta t = (v/C)\,C\,\Delta t = \beta\,C\,\Delta t$$

حيث: C هي سرعة الضوء في الفراغ، β هي:

$\beta = v / C$

وخلال هذه الفترة نفسها ينتقل الشعاع الخارج من المـــادة مـــن النقطة A إلى النقطة D مسافة مقدارها:

$$A D = (C / n) \Delta t$$

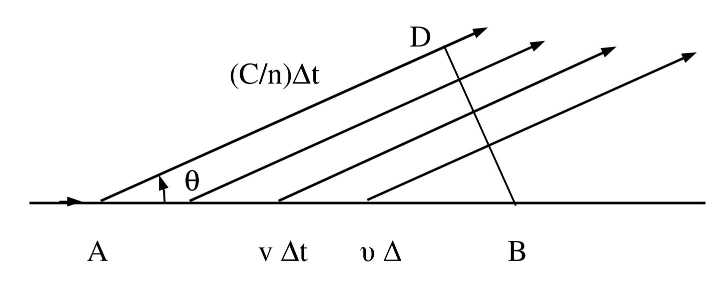
حيث: n معامل انكسار الضوء للمادة. ومن الشكل (4−24) يتبين أن:

$$\cos \theta\theta = AD / AB = 1/ \beta n \qquad (4\text{-}29)$$

وتحدد هذه العلاقة الحد الأدنى لقيمة β التي ينتج عنها صـــدور إشعاعات تشرنكوف، حيث نجد أنه بالنسبة للمادة المعينة يجب ألا يقــل مقدار β عن:

$$\beta_{min} = 1 / n \qquad (4\text{-}30)$$

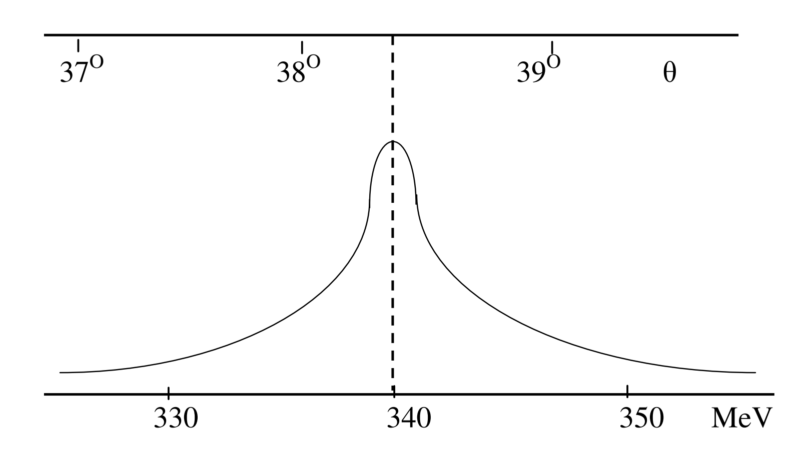
فإذا كانت β أقل من هذا المقدار لا تصدر إشعاعات تشرنكوف عن المادة. وإذا كان معامل الانكسار لمادة ما n = 1.5 ، ومقــدار β =1 يلاحظ أن: $\theta_{max} = 48^o$. أي أن الطاقة التي يفقدها الجسيم تخــرج فـــي صورة إشعاع مخروطي زاوية رأسه هي: 48 ×2 = 96° ، ومحـــوره



شكل (4−24): شكل هويجن

هو اتجاه مرور الجسيم. ويمكن الكشف عن الضوء الصادر باســـتخدام أنبوب التضاعف الفوتوني.

وقد استخدم أثر تشرنكوف لعمل كواشف، بغرض تحديد طاقة الإشعاعات، وذلك بقياس الزاوية القصوى للإشعاعات الصادرة. ويبين شكل (5−25) طيف البروتونات بطاقة 340 ميغا إلكترون فولت، عند الكشف عنها باستخدام عداد تشرنكوف.



شكل (4−25)
طيف البروتونات بطاقة 340 ميغا إلكترون فولت
عند الكشف عنها باستخدام عداد تشرنكوف

4−14 ألواح وأفلام التصوير المستحلبة

Photo- emulsion plates and films

عند مرور الإشعاعات المؤينة كالجسيمات المشحونة الثقيلة والخفيفة والأشعة السينية وإشعاعات جاما خلال ألواح أو أفلام التصوير المستحلبة فإنها تؤين المادة المستحلبة، وتؤدي بالتالي إلى إحداث عتامة في الفيلم أو اللوح الحساس، مثلما يؤثر الضوء المرئي تماما. ويتكون الفيلم الحساس، عموما، من طبقة جيلاتينية رقيقة من مادة بروميد الفضة (Silver bromide) ملتصقة على فيلم بلاستيك شفاف. وفي حالة الألواح الحساسة تستخدم ألواح من الزجاج الشفاف بدلا من البلاستيك. وعند مرور الضوء أو الإشعاعات المؤينة في هذه الطبقة الحساسة تمتص

طاقة هذه الإشعاعات (أو جزء من طاقتها) في مادة بروميـــد الفضـــة، فينتج عن ذلك تكون حبيبات صغيرة (تحتوي الحبيبة عادة علـــى عـــدة ذرات) من فلز الفضة. وعند معالجة الفيلم بالأحماض الخاصة بالإظهار والتثبيت يزداد عدد ذرات الفضة الفلزية في كل حبيبة، فيكبر حجمهـــا وتظهر في شكل حبيبات سوداء على الفيلم البلاستيك أو اللوح الزجاجي. وتعتبر عملية المعالجة بمثابة عملية إظهار وتكبير لحجم الحبيبات، حيث يمكن أن يزداد حجمها بواقع 10^8 مرة. وتتضمن معالجة الفيلم إظهاره ثم تثبيته في حمام يحتوي على مادة الهيبو (hypo)، لإزالة مادة بروميـــد الفضة التي لم تتأثر بالإشعاعات أو الضوء.

وللحصول على نتائج طيبة وعلى صورة واضحة يجـــب اختيـــار مواد المعالجة بتراكيز مناسبة، وتحديد أنسب درجـــات الحـــرارة لهـــذه العمليات، وتحديد الزمن المناسب لعمليتي الإظهار والتثبيت.

وهكذا يظهر أثر مرور الجسيمات المشحونة والإشعاعات في شكل حبيبات سوداء على الفيلم أو اللوح الحساس. وقد لا يمكن رؤية الحبيبات بالعين المجردة ولكن يمكن رؤيتها بسهولة تحت الميكروسكوب.

ومع تطور أنواع الكواشف النووية الأخرى قل اســـتخدام الأفـــلام والألواح الحساسة للكشف عن الإشعاعات ذات الطاقات المنخفضـــة، إلا أن هذه الكواشف ظلت مستخدمة استخداما واسعا في مجـــال الطاقـــات العالية والأشعة الكونية. ولهذه الأغراض تستخدم ألواح حساسة يتراوح سمك الطبقة الحساسة فيها بين 20 ، 800 ميكرون. ويمكن استخدام هذه الألواح لتحديد عدد الجسيمات (كثافة الإشعاعات) ونوعها وطاقتها. فعند تحديد كثافة الحبيبات وطول الأثر على اللوح وبمعرفة العلاقة بين المدى والطاقة (راجع الفصل الثالث) يمكن معرفة نوع الإشعاعات وطاقاتها.

وعند استخدام الأفلام أو الألواح الحساسة للكشف عن الجســـيمات التي لا تؤدي للتأين المباشر، مثل الأشعة الســـينية وإشـــعاعات جامـــا والنيوترونات، فإنه يوضع في المادة الحساسة مواد ينتج عنها جســـيمات مشحونة عند تفاعل الأشعة الساقطة معها. فعلى سبيل المثـــال، يمكـــن الكشف عن النيوترونات البطيئة بوضع نسبة تصل إلى حوالي 1 % من

مادة الليثيوم أو البور في المادة الحساسة. وعند الكشف عن الأشعة السينية أو إشعاعات جاما يتم وضع شريحة رقيقة جدا من الرصاص فوق المادة الحساسة لإحداث أي من العمليات الثلاثة عليها.

وتتميز الألواح والأفلام الحساسة عن بعض الكواشف الأخرى بالآتي:

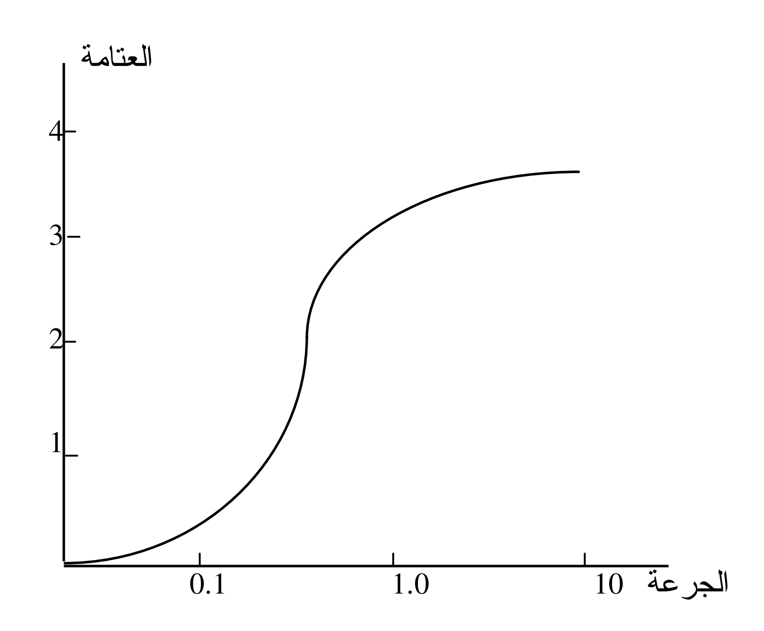
أ- سهولتها وحساسيتها وبقاء الأثر بصفة دائمة عليها.
ب- خفة الوزن وصغر الحجم وانخفاض تكلفتها.
ج- الكثافة العالية لمادة المستحلب الحساسة مما يجعل لها قدرة إيقاف عالية بحيث يمكن استخدامها عند الطاقات العالية.

وأهم عيوب الألواح والأفلام الحساسة هي:

أ- إيجاد طول الأثر وكثافة الحبيبات وزوايا التشتت يستغرق وقتا طويلا من العمل على الميكروسكوب.
ب- نظرا لقصر مدى الجسيمات في مادة المستحلب فإنه يلزم مجال مغناطيسي كبير جدا لإحداث انحرف ملموس في المسار بغرض تحديد زخم الجسيمات.

وعموما، تستخدم الأفلام الحساسة في الوقت الحالي استخداما واسعا للكشف عن الإشعاعات وتحديد الجرعات الإشعاعية التي يتعرض لها العاملون بالإشعاعات والمواد المشعة. ولهذا الغرض، تستخدم أفلام حساسة (مقاس 30 x40 مم) موضوعة داخل حافظة لا تتعرض للضوء. وبعد معالجة الفيلم يتم قياس شدة العتامة الناتجة فيه وذلك بتمرير ضوء خلاله. ويتم تحويل شدة العتامة إلى جرعة إشعاعية ممتصة، وذلك باستخدام منحنى يعرف باسم منحنى المعايرة. ويتم عمل هذا المنحنى بتعريض عدد من الأفلام لجرعات إشعاعية مختلفة ومعلومة وقياس درجة العتامة عند كل جرعة معينة، ثم ترسم العلاقة

بين الجرعة الإشعاعية ودرجة العتامة. ويبين شكل (4–26) أحد هــذه المنحنيات عند استخدام أفلام بحساسية معينة.



شكل (4–26)
العلاقة بين درجة العتامة والجرعة في استخدام ألواح التصوير المستحلبة

وتعتمد حساسية الفيلم، عموما، على حجم حبيبات بروميد الفضة. وعند قياس جرعات إشعاعية عالية تستخدم أفلام ذات حساسية منخفضة. أما عند قيس الجرعات الإشعاعية المنخفضة فيلزم استخدام أفــلام ذات حساسية عالية. وعموما، توجد أفلام تصل حساسيتها إلــى مــدى مــن الجرعات يتراوح بين 10 مللي رم و 10 رم.

4–15 أسئلة ومسائل للمراجعة

1- قارن بين كل من غرفة والتأين والعداد التناسبي وعداد غايغر من حيث القدرة التحليلية والجهود المستخدمة وشكل النبضة.

2- اشرح الفرق بين غرفة التأين النبضية، والأخرى التي تعمل بنظام التيار المستمر، وما هي إمكانيات استخدام كل منها؟.

3- اشرح دور كل من الحلقات الحارسة والشبكة في غرفة التأين، وفي أي نوع من الغرف تستخدم الشبكة؟.

4- اشرح كيفية حدوث الإطفاء باستخدام دارة خارجية وذاتيا في عدادات غايغر.

5- ما هو تعريف الزمن الميت وزمن الاسترجاع في عداد غايغر؟.

6- قارن بين الأنواع المختلفة لغرف التأين من حيث نوع الإشعاعات التي يمكن تسجيلها.

7- كيف يمكن استخدام الكواشف الغازية للكشف عن النيوترونات وإشعاعات جاما؟، وما هي كفاءتها لهذه الإشعاعات؟.

8- عرف القدرة التحليلية للطاقة والقدرة التحليلية الزمنية للكاشف.

9- اشرح الخطوات التي تحدث لإشعاعات جاما ابتداء من سقوطها على الكاشف الوميضي وحتى ظهور النبضة الكهربائية على مخرجه.

10- أذكر أنواع المواد الوميضية، وقارن بينها من حيث الاستخدام للكشف عن الإشعاعات المختلفة.

11- ما هي أهم مزايا الكواشف الوميضية بالمقارنة بالغازية؟.

12- عرف كفاءة الكاشف، واشرح كيف تتغير كفاءة الكاشف بتغير الطاقة بالنسبة لأنواع الإشعاعات المختلفة.

13- كيف تتغير كفاءة الكاشف بتغير حجم البلورة (للكواشف الوميضية)، وبتغير ضغط الغاز للكواشف الغازية؟.

14- كيف تتغير القدرة التحليلية للطاقة بزيادة حجم البلورة للكاشف الوميضي؟، ولماذا؟.

15- كيف يؤثر الجهد على معامل التضاعف في أنبوب التضاعف الفوتوني؟، وكيف تتغير القدرة التحليلية للكاشف الوميضي بتغير الجهد؟.

16- ما هو دور كل من قطب تركيز الحزمة الإلكترونية والدينود في أنبوب التضاعف الفوتوني؟.

17- ما هي أهم مزايا وعيوب الكواشف المجهزة من أشباه الموصلات؟.

18- لماذا تتميز الكواشف المجهزة من أشباه الموصلات بقدرة تحليلية عالية؟.

19- اشرح لماذا يغرس الجرمانيوم ثقبي التوصيل بمادة الليثيوم لاستخدامه كاشفا لإشعاعات جاما؟.

20- اشرح كيفية عمل الكاشف السليكوني.

21- اشرح كيفية عمل كاشف الجرمانيوم ليثيوم.

22- ما هي مزايا كاشف الجرمانيوم عالي النقاء بالمقارنة بكاشف الجرمانيوم ليثيوم؟.

23- كيف تعمل الغرفة السحابية كاشفا؟، وما هي أهم مزاياها وعيوبها؟، وما مجال استخدامها؟.

24- ما الفرق بين الغرفة السحابية وغرفة الانتشار؟.

25- اشرح كيفية عمل الغرفة الفقاعية كاشفا، وما هي أهم مزاياها وعيوبها؟.

26- اشرح كيفية عمل العداد الشراري.

27- ما هو مبدأ عمل كواشف تشرنكوف؟، وكيف يمكن استخدامها لتحديد طاقة الجسيمات؟.

28- اشرح كيف تستخدم الألواح الحساسة عند الطاقات العالية؟.

29- ما هو مجال استخدام الأفلام الحساسة؟، وكيف يمكن استخدامها لتحديد جرعات التعرض الشخصي؟.

30- جسيم ألفا يفقد كل طاقته في غرفة تأين منتجا 12000 زوج إلكتروني أيوني. اوجد الشحنة الكلية الناتجة عن تجميع أي من الإلكترونات أو الأيونات. وإذا كانت السعة الداخلية للغرفة 25 بيكوفارد والجهد العالي المطبق 250 فولت، فما هو التغير الناتج في هذا الجهد؟.

31- جسيمات ألفا طاقتها 4.25 ميغا إلكترون فولت تدخل غرفة تأين بمعدل 300 جسيم في الثانية، فما هو التيار الناتج عن هذه الجسيمات إذا كانت الجسيمات تفقد كل طاقتها داخل الغرفة والطاقة اللازمة لتكوين زوج إلكتروني أيوني هي 35 إ.ف؟.
أوجد قيمة المقاومة الواجب توصيلها على التوالي مع الغرفة ليصبح فرق الجهد الناتج عليها 0.1 فولت، 1 فولت.

32- إذا كان متوسط الممر الحر للإلكترون في عداد تناسبي هو 1 ميكرومتر، وكان معامل التضاعف في هذا العداد هو 4096 ، فما هي المسافة من سلك الأنود التي تبدأ منها عملية التضاعف؟.

33- إذا كان نصف قطر سلك الأنود في المثال السابق 10 ميكرومتر ونصف قطر الأنبوب الداخلي 10 مم، فما هي شدة المجال عند الأنود إذا كان الجهد المستخدم هو 1200 فولت؟.

34- عند دخول جسيم بيتا بطاقة مقدارها 1.7 ميغا إلكترون فولت نتج عنه 5.5×10^{7} زوج إلكتروني في عداد غايغر، فما هو معامل التضاعف لهذا العداد؟، علما بأن الطاقة اللازمة لتكوين زوج واحد هي 35 إ.ف.

35- ما هو عدد الدينودات المطلوبة لأنبوب التضاعف بحيث تحقق الأنبوب معامل تضاعف مقداره 10^{6} ؟، إذا كان معامل الانبعاث الثانوي للدينودات متساويا ويساوي 4.
وعند انخفاض الجهد لقيمة معينة أصبح معامل الانبعاث الثانوي 3 ، فما هو معامل التضاعف الجديد؟.

36- عند استخدام عداد تشرنكوف لتحديد طاقة جسيمات ألفا كانت زاوية رأس المخروط 80° ، أوجد سرعة هذه الجسيمات.